



Berichte des Deutschen Wetterdienstes

222

KONRAD
**Konvektionsentwicklung in Radarprodukte -
ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen
und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten**

von
Peter Lang
Otto Plörer
Herbert Munier
Johann Riedl



Zitationsvorschlag:

Lang, Peter u.a.: KONRAD: Konventionsentwicklung in Radarprodukte / ein operationelles Verfahren zur Analyse von Gewitterzellen und deren Zugbahnen, basierend auf Wetterradarprodukten. - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2003 (Berichte des Deutschen Wetterdienstes ; 222)

ISSN der Onlineausgabe: 2194-5969

ISSN der Druckausgabe: 0072-4130

Nutzungsbedingungen



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz

Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Herausgeber und Verlag: :

Deutscher Wetterdienst
Frankfurter Straße 135
D- 63067 Offenbach am Main

Internet: www.dwd.de

Mail: bibliothek@dwd.de

Vorwort

Das grundlegende Problem bei allgemeinen Gewitterwarnungen besteht in einer Wahrscheinlichkeitsaussage, die bisher im Hinblick auf die Häufigkeit mit Begriffen wie „vereinzelt, verbreitet“, und im Hinblick auf die Intensität mit „leicht, mittel und schwer oder heftig“ beschrieben wurde. Da die Gewitterbildung als stochastischer Prozess keine exakte Angabe des Entstehungsortes erlaubt, können Warnungen auf der Grundlage von Wetterkarten nur in allgemein gehaltenen Aussagen ausgegeben werden.

Das Radar dagegen ermöglicht als Fernortungsverfahren das Niederschlagsfeld zu erfassen und anhand der Echostärke und der Vertikalerstreckung von Starkechos Gewitterzentren zu erschließen. Damit ist zunächst die Kenntnis über den aktuellen Standort gegeben. Die wiederholte Ortung in festem Zeittakt bietet grundsätzlich an, die Lage von Gewitterherden zu speichern und so – zusätzlich zur Bewertung der Zelle – ein Verfahren zur Aufzeichnung der Zugbahn zu entwickeln. Dies wird in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Es wird oft der falsche Eindruck erweckt, dass ein Gewitter wie eine Wolke weiterzieht. Eine der meteorologischen Erfahrungen besagt, dass Schauer- und Gewitterwolken sich etwa mit dem Wind in 3 km Höhe bewegen. Dies ist aber nur bedingt korrekt, denn es ist vielmehr der Gewitterprozess, der sich verlagert und in dessen Verlauf sich die Wolke und der Gewitterherd ständig neu bilden. Das Gewitter baut wie jede andere konvektive Wolke Labilität in der Atmosphäre ab und die Verlagerung des Prozesses entwickelt sich in die Richtung, in der die Labilität am größten ist. Es können also ständig neue Tochterzellen entstehen, während die Hauptzelle schon wieder abstirbt. Die Lebensdauer einer Einzelzelle beträgt nur etwa eine Stunde und der Eindruck, dass ein Gewitter über weite Strecken zieht, entsteht wie beim Stafettenlauf nur durch aneinandergereihte Bildung von Einzelzellen kürzerer Lebensdauer. In Bezug auf die Zugbahn bedeutet dies keine unbedingt gradlinige Verlagerung sondern ein gewisses Taumeln um eine mittlere Zugbahn.

Erreicht das Gewitter extreme Unwetterstärke, dann hat es eine eigene organisierte Zirkulation entwickelt, wie z.B. bei einer Superzelle. Diese Zellen verlagern sich häufig nicht mehr mit der mittleren Windrichtung sondern „scheren nach rechts aus“. Da bei solchen Wetterlagen die Labilität nicht in der vorherrschenden Windrichtung am größten ist sondern im Uhrzeigersinn rechts davon, zieht der Gewitterprozess in Richtung der stärksten Labilität und schafft die bodennahe feuchtheiße Luft wie ein Riesenstaubsauger nach oben. Es wurden schon Fälle dokumentiert, in denen die Einzelzellen mit der Windrichtung in 3 km Höhe nordostwärts zogen und abstarben, während rechts (östlich) davon ein neues Gewitter entstand, das dann wieder mit dem Höhenwind zog. Hier waren die Einzelzellen deutlich getrennt zu orten und man konnte eine unterschiedliche Verlagerungsrichtung von Einzelzellen und Gesamtprozess nachweisen.

Mit dem Gewitter sind mehrere markante Phänomene wie Windböen, Starkregen, Blitze und Hagel verbunden. Solche Erscheinungen werden mit dem Radar nicht direkt erkannt. Vielmehr versucht man, aus der im Radar feststellbaren Echostruktur und dem Auftreten der Wettererscheinungen Algorithmen zu entwickeln, um die Wahrscheinlichkeit dieser Erscheinungen zu erschließen. Diese Wettererscheinungen treten auch nicht alle am gleichen Ort auf sondern Blitzzentren, Hagelzentren, Starkregengebiete haben verschiedene

eigene Zentren und Ausdehnung. Die Böenfront eilt dem Gewitter sogar in der Regel voraus oder tritt auf, wenn die allerersten Tropfen fallen.

Das vorliegende automatisch laufende Verfahren KONRAD zeigt die Position von Gewittern an, zeichnet ihre Zugbahn auf, gibt Warnhinweise auf Gewitterstärke und Wettererscheinungen und unternimmt eine Vorhersage für die zu erwartende Lage. Damit wird z.B. der meteorologische Laie in die Lage versetzt, eigene Entscheidungen zu treffen. Im jetzigen Entwicklungsstadium des Programms sind Lage- und Starkregenhinweise am verlässlichsten. Die Hagelalgorithmen entsprechen dem Wissensstand der Fachliteratur und die Warnungen für Windböen bilden einen ersten Schritt. Alle Phänomene bedürfen der Überprüfung und mit wachsender Praxiserfahrung gegebenenfalls noch einer Korrektur. Die jetzige Startphase ist aber soweit abgeschlossen, dass der externe Nutzer bereits eine wesentliche Entscheidungshilfe für seine Aufgaben erhält, auch wenn der Fachmann bestrebt ist, vorerst noch an der Verbesserung weiterzuarbeiten. Daher werden in der vorliegenden Arbeit auch Fallbeispiele gezeigt, in denen das Verfahren versagt, unter Angabe der Gründe, soweit sie bekannt wurden. In einer späteren Entwicklungsphase II werden verbesserte Algorithmen zum Einsatz kommen.

Eine weitere wichtige Vorbemerkung muss sich auf den technischen Stand des Radarverbundes und der einzelnen Radargeräte und Standorte beziehen. Das Verfahren kann nur dann brauchbare Ergebnisse liefern, wenn auch ein Qualitätsmanagement für die Ausgangsdaten existiert. Der Aufbau ist im DWD begonnen aber auch hier sind noch Maßnahmen zu verwirklichen, die einige Zeit benötigen. So sind im Radarverbund einige ältere Radargeräte vorhanden, die erst aufgerüstet oder ausgetauscht werden müssen. Bevor dies vollzogen ist, kann es zu Qualitätseinbußen bei den Ergebnissen des KONRAD-Verfahrens kommen.

Die im vorliegenden Bericht dargestellte Entwicklung von KONRAD ist noch nicht abgeschlossen, sondern es besteht ein Verbesserungspotential in vielfacher Hinsicht.

Dr. P. Winkler, Leiter FEHp

Zusammenfassung: Ziel des Verfahrens KONRAD[©] (KONvektionsentwicklung in RA-Darprodukten) ist es, aus strukturierten Standardbildprodukten des DWD-Radarverbundes Echos konvektiver Zellen (Gewitter, >46 dBZ, Schauer) zu isolieren. Weiterhin sind die Zellkerne hinsichtlich des Entwicklungsstadiums und des Gefährdungspotentials (Hagel, Starkregen, Windböen) unterscheidbar. Die Zugbahn ergibt sich aus den Ortungen wobei eine 30min Rückschau und Vorschau der extrapolierten Bahn erfolgt. Die Darstellung der Zellattribute geschieht mittels eigener Symbole auf einer geographischen Hintergrundkarte mit Zoomfähigkeiten. In der Entwicklungsphase werden parallel zwei Ausgangsprodukte analysiert. KONRAD PZ bewertet im 15-min Takt die dreidimensionale Echoverteilung (230 km Reichweite, Auflösung 2x2 km²), KONRAD PX analysiert das alle 5 Minuten erstellte zweidimensionale PX-Produkt (100 km Reichweite, Auflösung 1x1 km²). Die Zellverfolgung liefert nur auf der 5-Minuten-Basis gute Ergebnisse während z.B. die Hagelwarnungen aus dem dreidimensionalen Zellvolumen sicherer sind. Bisher wurde nur KONRAD PX in die Nutzererprobung (Einsatzkräfte) gegeben. Zukünftig muss die Vertikalinformation integriert werden. Konvektive Zellkerne sind an >10km² mit >23mm/h gekoppelt und bzgl. Entwicklungsstadium klassifiziert. Die zweistufige Hagelwarnung geht auf >73 mm/h Kerne bzw. bestimmter Fläche zurück oder anhand der Echostärke 55 dBZ in der Vereisungszone oberhalb von 6 km Höhe (bei PZ). Die Warnung "Starkregen" spricht an, wenn an Pixeln wegen mehrfacher 5 min-Überlappung Niederschlag über 12 mm/30 Minuten zu erwarten ist. Die Böenwarnung (> Bft 8) wird aus der Verlagerungsgeschwindigkeit der Zelle oder linienhaften Zellkernechos abgeleitet.

Anhand von zahlreichen Beispielen werden Wirkung und Grenzen von KONRAD in unterschiedlichen Unwettersituationen aufgezeigt.

Bei der Verifikation von KONRAD wurden Medienmeldungen verwandt. Fehlwarnungen bleiben unsicher. KONRAD stützt sich nur auf konvektive Prozesse, sodass einige andere Warnungen ausbleiben. Verbesserungen sind durch Hinzunahme von Doppler- Winddaten zu entwickeln.

Abstract: The objectives of the KONRAD[©] method (CONvection development in RADar products) are focused on the isolation of convective cell core echoes (>46 dBZ) in the standard radar images of the DWD radar network. Furthermore these cell cores can be distinguished by their state of development and hazard potential (hail, flood, gusts). The cell track is marked by a 30min review and preview of the recent extrapolated track. The presentation of all cell attributes is performed by new symbols and a geographic underlay with zoom. In the first stage of KONRAD two products were analysed in parallel: KONRAD PZ from the 3D PZ image (230 km range, 2x2 km² resolution) available every 15 minutes and the 2D PX image (100 km range, 1x1 km² resolution) is analysed by KONRAD PX every 5 minutes. The cell core tracking works better on the 5 minutes basis while the hail warning based on the 3D cell volume is more reliable. Presently only KONRAD PX is tested by users (emergency authorities). In the near future the vertical cell information has to be integrated. Convective cell cores are based on >10km² with >23 mm/h and classified by their state of activity. The two-level hail warning originates in >73mm/h core intensity and area or a hail signal of >55 dBZ in the icing region above 6km height (PZ). The "flood" warning is issued after a multiple coverage of local reflectivities resulting in 12mm/30min. The gust warning (> Bft 8) is derived from the propagation speed or a line echo shape of the cell core.

The efficiency and limits of the application of KONRAD are demonstrated by numerous examples of convective cell conditions with hazards.

For the KONRAD verification reports of the media were used. False warnings remain unreliable. KONRAD is based on convective processes only and leads to some other missing warnings. Improvements have to be developed by the incorporation of Doppler wind data.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Zusammenfassung / Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
1. Einführung, Motivation	7
2. Der Radarverbund des DWD	7
3. Routine-Radarprodukte zu Gewitterentwicklungen	8
4. KONRAD [©] -Zielsetzung	9
5. Zellverfolgung in 2 Ausgangsprodukten PZ und PX	9
5.1 Zellkonvention, -identifikation, -verfolgung	9
5.2 Zellanalyse	11
5.3 Pseudozellen	14
6. Liste der charakteristischen Zellparameter	15
6.1 Hauptliste Primärzellen	15
6.2 Ergänzungsliste	20
7. Warnphilosophie und Warnalgorithmen	20
7.1 Hagelwarnung	21
7.2 Starkregenwarnung	22
7.3 Böenwarnung	23
8. Prognoseansätze	25
9. Darstellung von KONRAD [©] -Parametern und -Informationen	26
9.1 Symbole und Legende der KONRAD [©] -Darstellung	26
9.2 Weitere Darstellungsinhalte des KONRAD [©] -Produkts	30
10. Fallbeispiele KONRAD [©] , Ergebnisse, Medienberichte	31
10.1 Gewitterformationen Berlin	31
10.2 Frühjahrs-Starkregenfälle	34
10.3 Schnellziehende Zellen mit Böen	35
10.4 Zellen mit ausgeprägtem Hagel	39
11. Verifikation der Ergebnisse, Reproduzierbarkeit, Statistiken	45
11.1 Verifikation der KONRAD [©] -Informationen	45
11.2 Zell-Analyse durch benachbarte Radargeräte	47
11.3 Erste Statistiken zu Zellverläufen	51
12. KONRAD [©] außerhalb der Sommerjahreszeit	54
13. Kooperationen und Praxiserprobung bei KONRAD [©]	54
14. Zusammenfassung der Ergebnisse	55
15. Ausblick	58
Danksagungen, Literatur	59

1. Einführung, Motivation

Die Nutzung von Wetterradargeräten bot seit ihrem Beginn neben der quantitativen Niederschlagsbestimmung auch die Möglichkeit der Ortung und Bewertung von stark konvektiven Niederschlagsgebieten. Die Verfahren haben sich von der frühen interaktiven "manuellen" Nutzung hin zur automatisierten Interpretation und Darstellung in Bildprodukten gewandelt. Radardaten sind, wie alle Fernerkundungsdaten, nicht frei von störenden Einflussfaktoren (z.B. Festzielechos, anormale Strahlausbreitung, Dämpfung).

Nachdem die Filterung von permanenten und temporären Bodenechos mit optimierten Parametereinstellungen an den modernen Signalprozessoren in Doppler-Wetterradaranlagen des DWD zufriedenstellend gelöst war (*Seltmann, 1999*), konnte jetzt der Schritt zur automatischen Interpretation stark konvektiver Zellen mittels des KONRAD-Verfahrens (KONvektionsentwicklung in RADarprodukten) vollzogen werden.

2. Der Radarverbund des DWD

Das Radarnetz (Radarverbund) des Deutschen Wetterdienstes DWD ist aus 16 C-Band Wetterradargeräten von Enterprise Electronic Cooperation bzw. Gematronik aufgebaut. Die Standortwahl, der Betrieb, sowie die regelmäßige Wartung und Geräteeichung obliegen der Abteilung Service und Logistik des DWD.



Radarstandorte von N→S:		
Rostock:	10169	35m
Hamburg:	10147	46m
Emden:	10204	59m
Berlin-Tphf.:	10384	80m
Hannover:	10338	81m
Ummendorf:	10356	185m
Essen:	10410	180m
Flechtendorf:	10434	538m
Dresden:	10488	263m
Neuhaus:	10557	873m
Neuheilenbach:	10605	580m
Frankfurt:	10637	146m
Eisberg:	10780	799m
Türkheim:	10832	731m
München :	10871	515m
Feldberg:	10908	1506m
Hohenpeißenberg:	10962	1005m

Abb. 1: Karte der DWD-Wetterradarstationen, ergänzt durch das Forschungsradar Hohenpeißenberg (blau), mit ihren Kennziffern, Höhen und 100km-Umkreisen, etwa entsprechend der KONRAD-Anwendungsbereiche.

Die primäre Messgröße ist der Radarreflektivitätsfaktor Z , die Summe der Reflektivitäten der einzelnen Tröpfchenquerschnitte in einem Normvolumen mit der Einheit mm^6/m^3 . Dabei wird verdeutlicht, dass über die 6. Potenz der Durchmesser (sogar einzelne) große Tropfen im Tropfenspektrum deutlich stärker in Z eingehen als viele kleine Tröpfchen, was für die Erkennung konvektiver Niederschlagsprozesse durchaus vorteilhaft verwendbar ist.

Die Daten werden in Polarkoordinaten erfasst, d.h. ein Z-Wert, meist in seinem logarithmischen Maß dBZ geführt, ist einem Kegelstumpfvolumen von 1° Öffnungswinkel und 1 km Länge zugeordnet. Bereits bei der Transformation in kartesische Koordinaten erfolgt eine polarstereographische Projektion auf 60°N/10°E. Es wird für den gesamten Datensatz nur der für den Radarstandort gültige Streckungsfaktor (3 bis 7% für Hamburg bis München) angewendet. Die momentane Regenrate R wird aus Z standardmäßig über eine Z/R-Beziehung von $Z = 256 * R^{1,42}$ abgeleitet.

Eine Berücksichtigung eines anderen Aggregatzustandes (Graupel, Schnee usw.) findet nicht automatisch statt. Eiskerne wie Hagel befinden sich durch ihr festes Medium wie auch durch die größeren Durchmesser im Grenzbereich einer Quantifizierungsmöglichkeit d.h. können nur über ihr regenäquivalentes Z ausgrenzt bzw. identifiziert werden.

3. Routine-Radarprodukte zu Gewitterentwicklungen

Für ein Verfahren zum Erkennen und Verfolgen konvektiver Zellen steht nachfolgendes Ausgangsmaterial zur Verfügung. Das Standard-Produkt PL mit einer Reichweite von 230 km in 4 km² Pixelgröße, 6 dBZ-Klassen und 15 min Auflösung gibt die Schwerpunkte konvektiver Niederschläge wieder, über die Projektionen auch eine Übersicht (12 km Höhe, $\Delta h=1$ km) der vertikalen Verteilung maximaler Zell-Reflektivitäten.

Basis für dieses Produkt ist der dreidimensionale Reflektivitätsdatensatz (sog. Z-Cube), aus dem auch das Produkt PZ erzeugt wird, das die Echoverteilung in 12 Höhenschichten von je 1 km Mächtigkeit zeigt.

Radar-Produkt	2D od. 3D	Zeitschritt (min)	Max. Radius (km)	Auflösung (~km ²)	Klassen
PL Reflektivität	2D	15	20	4	6
PZ Reflektivität H1-12	3D	15	230	4/1	6
PX Reflektivität	2D	5 (3)	100	1	6
PF Reflektivität	2D	5 (3)	100	1	15
PH Regenhöhe	2D	60	100	1	15
PR/PW Wind/Windscher. *	2D	15	120	1	12
VAD Wind-Profil *	3D	15	~30	<1	Werte
PU Radialwind H1-12 *	3D	15	120	1	12

Tab. 1: Aufstellung der Radarprodukte der Radarverbundstationen (* = soweit dopplert) *

Daneben existiert 5minütig ein sog. PX-Produkt mit einer Reichweite von 100 km in der Auflösung 1 km², 6 dBZ-Klassen. Dieses Produkt geht auf einen speziellen alle 5 Minuten durchgeführten Antennenlauf zurück und ist als Quasi-2D-Produkt anzusehen. Demselben Antennenlauf entstammen auch das sog. PF-Produkt in 15 Reflektivitätsklassen und DX, das die Echodaten in voller Auflösung (0,5 dBZ) liefert. Diese Produkte können die Basis für Weiterentwicklungen sein. Von den Doppler-Radaranlagen stehen zusätzlich die Radialwindprodukte (PR und PU) sowie das lokale Windprofil VAD zur Verfügung, die in der jetzigen KONRAD-Version noch nicht verwendet werden.

4. KONRAD[©]-Zielsetzung

Die Zielsetzung von KONRAD (KONvektionsentwicklung in RADarprodukten) bestand vor allem in der automatischen softwarebasierenden Interpretation von Radarprodukten. Dazu sollte eine sonst nur im Filmlauf kurz sichtbare Verlagerung als Zugbahn von Gewitterzellen dargestellt werden, selbst wenn die Zelle in einen größeren Wolkenverband eingebettet ist. Außerdem soll das wegen zu vieler Details schwer interpretierbare Farbflächen-Radarbild in dBZ zu einer schnell erfassbaren Darstellung mit Symbolen und Legende verarbeitet und einem allgemeinen (auch fachinternen) Nutzerkreis nutzbar gemacht werden. Auch die wichtige Frage der geografischen Zuordnung war zu lösen, da der Wert einer guten Zellanalyse völlig von der Qualität der Ortszuordnung abhängt. Aus dem Radarbild wird das Unwettergeschehen herausgefiltert und dargestellt. Weniger wichtige Wettererscheinungen werden dabei weggelassen. Unter dem Zeitdruck der Nowcasting-Arbeit gilt es eine schnelle Übersicht über Unwetterzentren und ihr Warnpotential zu erreichen. Gerade wenn kurzfristig Entscheidungen zu treffen sind ist ein schnelles Hilfsmittel unentbehrlich.

Eine wesentliche Nutzererwartung ist es, online in weniger als 5 min das KONRAD-Produkt zu erhalten, da die Bildtaktzeit nominell ist.

Mit KONRAD sollte ferner eine Auswahl von Gewitterzellen höherer Aktivität (sog. Primärzellen) erfolgen um auch in 24h-Zugstößen kein "Dickicht" zu erzeugen.

Eine weiterer Anspruch war, die Ausgabe des Produktes KONRAD über einfache und übersichtliche Algorithmen zu beschleunigen und die Organisation bei Ausfall der Basisprodukte zu begrenzen. Auch waren KONRAD-Aussagen als "Paketinformation" gedacht, die umfassend eine Gewitterzelle beschreiben und mehr in der Synergie, denn im Einzelparame-ter hohe Qualität erreichen.

Erste KONRAD Versionen am MOHp gab es bereits Anfang der '90iger Jahre (*Lang, 1997*), die aber nicht online verfügbar waren. Der Nachweis der Realisation einer fertigen Trackingdarstellung an allen Verbundradars gelang 2000. Mit KONRAD vergleichbare Entwicklungsansätze anderer Gruppen zum Zelltracking wurde von *Burgess et al., 2001* beschrieben.

KONRAD ist ein Beispiel für anwendungsbezogene Entwicklung im FE-Bereich DWD. Es ist ferner als Basismaterial für Fachkreise aber auch für dezentrale Leitstellen mit einer lokalen Aufgabenstellung und Entscheidungskompetenz gedacht. Für den Nutzer vor Ort sind mehr Zellverläufe als nötig dargestellt, womit seine lokale Zellbewertung ergänzt und relativiert wird. Die graphische Darstellungsform von KONRAD, mit ihrer Hervorhebung von Interpretation und Kernaussage, ist ein wesentlicher Faktor zur Akzeptanz.

5. Zellverfolgung in 2 Regimen: PZ und PX

5.1 Zellkonvention, -identifikation, -verfolgung

Ausgangspunkt für KONRAD sind bislang die automatisch verteilten Standard-Bildprodukte PZ und PX des DWD-Radarverbunds.

Anders als bei aufwendigeren Algorithmen, die geschichtete Zell-Zentroids (zentrierte Ellipsenscheiben) schwerpunktmäßig projiziert als Zellkern in Bodennähe definieren (NEXRAD, Forsyth et al., 1981) wird bei KONRAD nur der bodennächste Zellkern (mit Bodenauswirkungen) gesucht. Dieser ist durch Überschreitung eines Reflektivitätswertes von 46 dBZ (ca. 23mm/h, ziehend) definiert, womit ein ausgeprägter konvektiver Intensitätskern im Bereich des Downdrafts markiert werden kann. Diese und höhere sommerliche Regenintensitäten kommen an der Station Hohenpeißenberg z.B. jährlich nur in 2,4 Stunden vor. Die Beschränkung auf den (jüngsten) bodennächsten Zellkern rührt von der Nutzungsanforderung einer optimalen 5 min Zellverfolgung einerseits und einer Verschiebung der Schichten bei z.B. 7-minütiger Säulenabtastung (PZ) andererseits her.

Der oftmals verzweigte Zellkern wird durch einen Rechteckrahmen umrissen und im Bild dargestellt. Dieser Rahmen soll dem Nutzer signalisieren, dass die Ausdehnung des Gewitters nicht nur den Symbolkreis umfasst, sondern der Zellkern mit diesem Rahmen zieht. Bei der PZ-Analyse wird der im ganzen Kernvolumen ermittelte vertikale Regenwassergehalt genutzt, um das Entwicklungsstadium der Zelle in farbigen Stufen zu klassifizieren. Im 2D-Basisprodukt PX kann nur die Kernfläche (Pixelzahl) mit einem möglicherweise zusätzlich eingelagertem Maximum >55 dBZ bewertet werden. Die Kerne, meist kleiner als $10 \times 10 \text{ km}^2$, erfordern künftig für genauere Analysen eine Verfeinerung der Reflektivitätsklassen von 6 auf 15. Das mäßigkonvektive, bzw. mehr stratiforme Zellenumfeld bleibt überwiegend außer Acht.

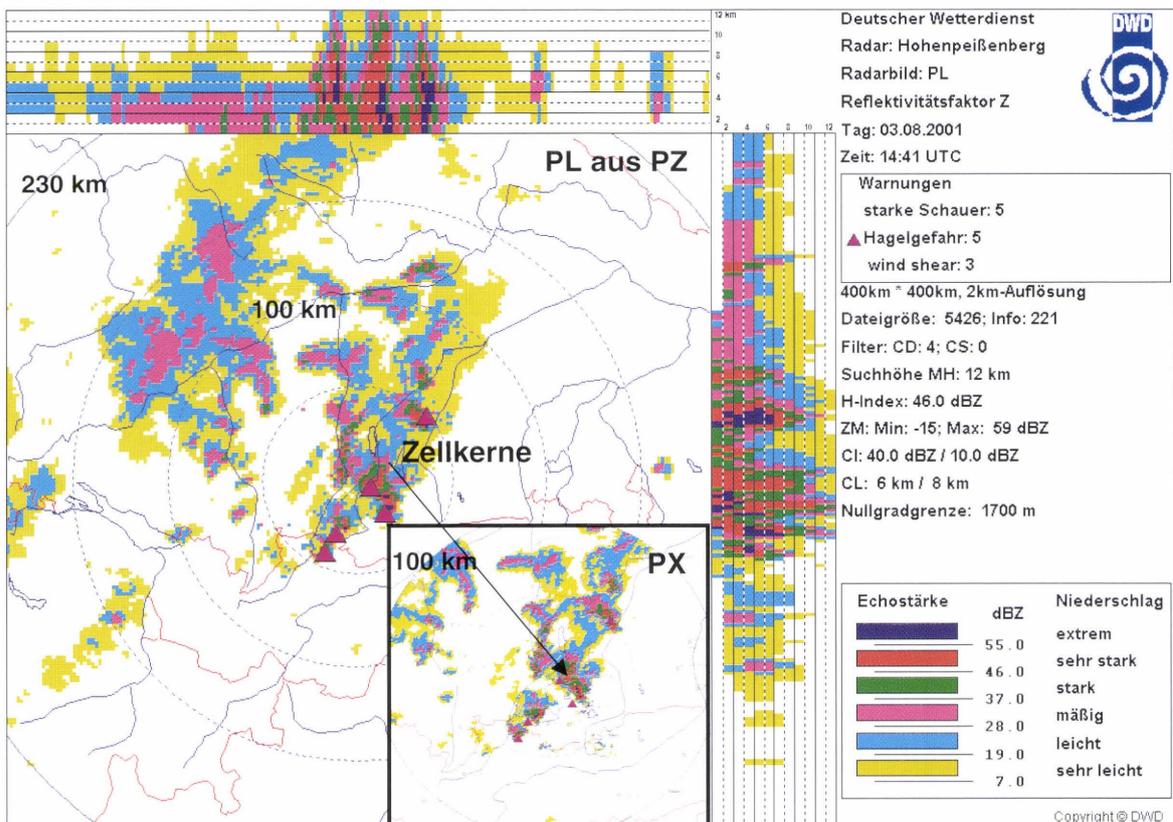


Abb. 2: Beispiel für die KONRAD-Ausgangsprodukte PZ (hier PL, bodennahe Reflektivität und vertikaler Zellaufbau in 12 Kilometerflächen in den seitlichen Maxima-Projektionen W→E und N→S) Das eingeschobene Bild zeigt die entsprechende PX-Darstellung.

In KONRAD sind die Zellkerne als Niederschlagsschäfte definiert und durch einen „Zentralpunkt“ repräsentiert, dessen Lage aus Rahmenmittelpunkt und Volumen- bzw. Flächen-Schwerpunkt des Kerns ermittelt wird. Dieser soll, einmal aktuell erkannt, im vorherigen Produkt wiedergefunden werden. Dazu wird in einem Suchradius entsprechend 110 km/h Zellverlagerung (bis 76 km/h bei *Hagen et al., 1999*) plus Schwerpunktsverlagerung (auch kleine "Sprünge") nach den korrespondierenden Zellzentren gesucht. Im Vorprodukt nicht wiedergefundene Zellen gelten als Neuzellen, aktuell nicht wiedergefundene Zellen werden als Auslaufzellen behandelt. Eine Verlagerungsvorgabe für junge Zellen ohne Vorgänger sind die möglicherweise schon existierenden Verlagerungsschritte von Nachbarzellen bis 50 km Entfernung.

Als Vorgängerzelle gilt jene, bei der die aktuelle Zelle nahe an ihrem Prognosepunkt liegt. Daneben ist ein kurzer Weg ein starkes Maß für Zusammengehörigkeit. Zuletzt ist auch eine gewisse Konsistenz der Größenkategorie einer Zelle ein weiteres Maß. Für die optimale Zuordnung dieser 3 gewichteten Größen ist ein evtl. mehrmaliges Abwägen verschiedener Zuordnungen in dem 11 km Suchradius notwendig. Dies und vermeidbare Fehlzuordnungen machen den Vorteil kurzer Vergleichszeitstritte deutlich. Trotzdem bleibt eine Tendenz "zeitliche" Nachbarzellen im 11 km Radius zuordnen zu wollen, obwohl einige wenige möglicherweise unabhängig sind.

Praxisnahes Tracking wurde von anderen Entwicklern z.B. mit dem TITAN System von *Dixon und Wiener (1993)* sowie in *Steinacker et al. (2000)* und im *COST 78 proj. 2, 1995* ausführlich beschrieben.

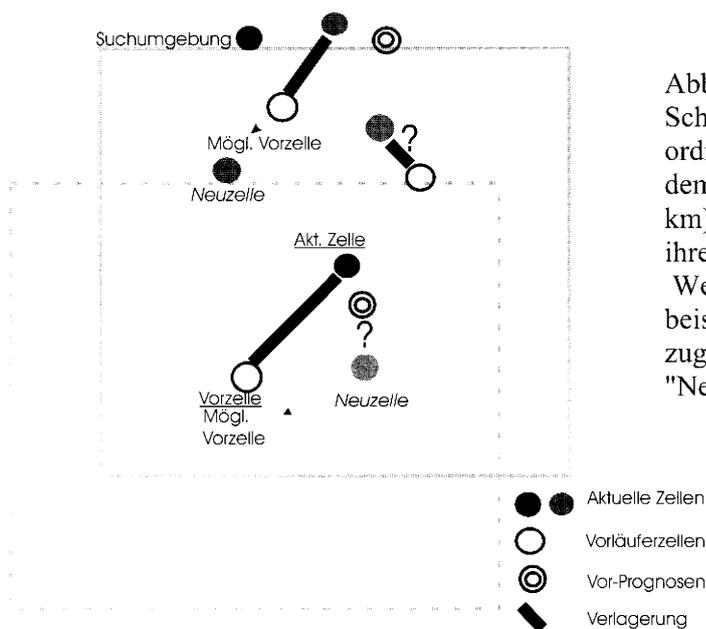


Abb. 3: Das Zelltrackingproblem: Schema der zurückgerichteten Zellzuordnung aus 2 Zeitschritten (5min) mit dem Beispiel einer Suchumgebung (11 km), der zentralen aktuellen Zelle (und ihrer Vorgängerzelle).

Weitere aktuelle Nachbarzellen sind mit beispielhaften Variationen Vorgängern zugeordnet, Übrigbleibende sind als "Neuzelle" definiert.

5.2 Zellanalyse

Um einen Zellzustand und Zellkern in eine Kategorie des Entwicklungsstatus einzuordnen, wird der klassifizierte Kernvolumen-Wassergehalt (Richteinheit: Tonnen [t]) und nicht nur das Vertically Integrated Liquid Water (VIL ab H=2 km, in mm/m²) als Basis für ein 4-

klassisches Zell-"Stadium" grün, gelb, rot, violett (vgl. Abb. 4) verwandt. Dieses läuft für PZ bzw. PX von z.B. 110 kt bzw. $<32 \text{ km}^2$ bis $>320 \text{ kt}$ und $>100 \text{ km}^2$. Beispielsweise soll das Zellstadium 1 ("grün") jegliche Anwesenheit von Hagel (in Bodennähe oder höher) ausschließen. Die Zellstadien im 2D-PX sind etwa auf die entsprechenden des 3D-PZ abgestimmt, unterscheiden sich aber zuweilen.

Neben dem Entwicklungsstadium soll KONRAD Warnhinweise zur Gefahr von Hagel, Starkregen und Windböen geben, die neben dem Unwetterkern durch ein Symbol eingetragen werden. Details zu den verwendeten Algorithmen werden in Kapitel 6 dargestellt.

Außer der Hagelwarnung sind noch die Starkregen- und Böenwarnungen der Zelle selbst zugeordnet. Als Gültigkeitsbereich der Warnungen gilt für Hagel der vom Rahmen umrissene (ziehende) Zellkern, für Starkregen der Bereich der 30 min-Zugbahn und für Böen ein gewisses Umfeld um den Zellkern, da Windböen oft vor dem einsetzenden Regen auftreten. Beim Starkregen-Pixelfeld sind die Ortspixel markiert, bei denen der Schwellwert ($>12 \text{ mm}/30\text{min}$) weitgehendst erreicht worden ist. Für eine Prognose ist jedoch ein früheres Feststellen des Starkregenstatus, bereits während seiner Entwicklung, erforderlich.

Die Schwellwerte bei der Zellanalyse (z.B. $12\text{mm}/30\text{min}$) sind den Klasseneinteilungen der Radarverbund-Produkte angepasst.

Erfahrungsgemäß sind die so gefundenen Primärzellen meist von Blitzentladungen begleitet. In den Standardprodukten des Radarverbundes, z.B. im RABID-Darstellungssystem, haben diese Zellen bereits zu 50-75% eine Hagelwarnung erhalten (Abb. 2).

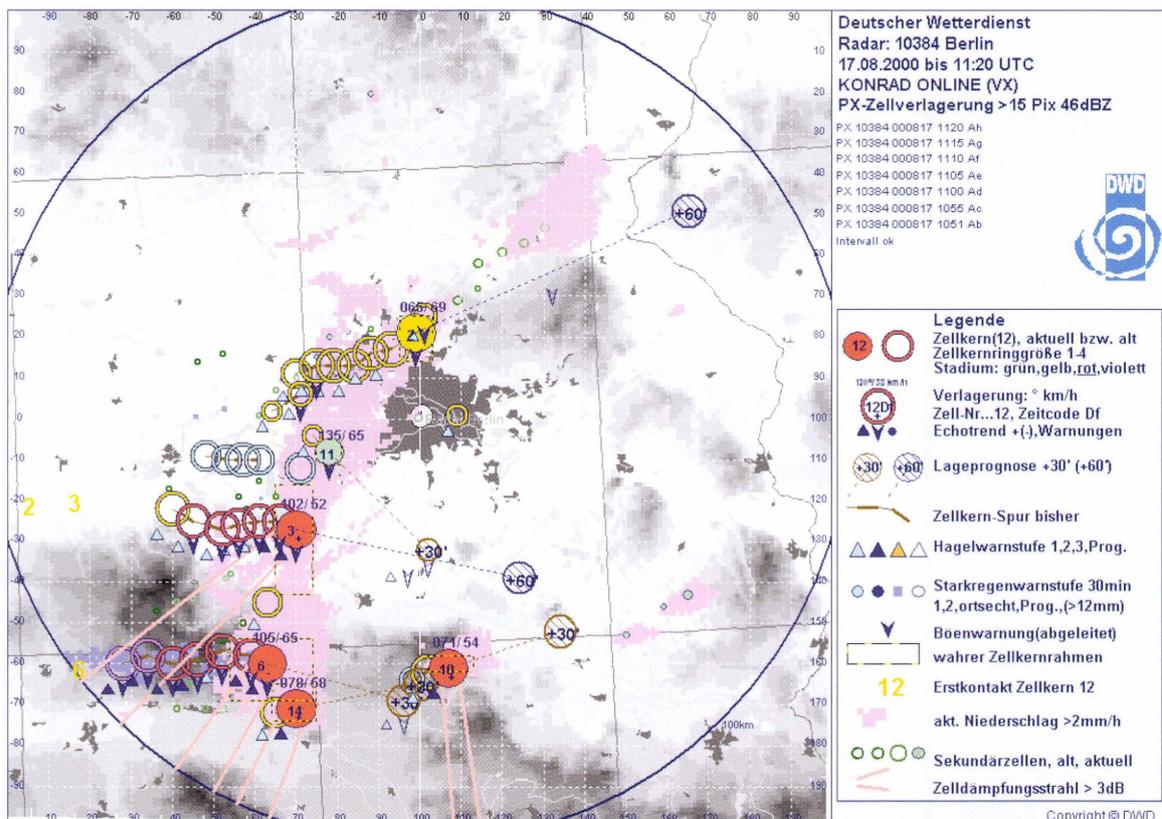


Abb. 4: Muster von KONRAD-Zellanalysen im Zuge einer Gewitterlinie, 17.8.00, Berlin

Neben den Primärzellen wurden zusätzlich auch sog. Sekundärzellen ohne Tracking und Bewertung eingeführt, die spätere Unwetter früh anzeigen können (Ausnahme Abb.5). Sie erfassen den konvektiven Niederschlagsprozess im Anfangsstadium (Regenintensität bei einem vertikal strukturierten Zellaufbau mit Eisphase) und zielen auf eine frühe Erfassung blitzaktiver Zellen. Die Zonen hoher Blitzaktivität sind allerdings weniger mit Echomaxima denn mit Gebieten mittlerer Reflektivitäten gekoppelt (Höller *et al*, 2000).

Mit dem jetzigen Status von KONRAD werden erst die wichtigsten, aber nicht alle Wettererscheinungen, die im Zusammenhang mit Gewittern auftreten, dargestellt. Versuche, aus scharfen Echogradienten auf die Lage sog. "weak echo regions" zu schließen (Bow-echo-Identifikation, Hagelkennzeichen, *Browning, 1977*) und in der Höhe Starkechoreservoirs zu identifizieren (Hagelstufe 3), sind noch im Konzept- und Teststatus.

Zuletzt wird die Zellanalyse noch um eine Anzeige von Gebieten erweitert, in denen die Zellanalyse zu abgeschwächt ausfallen kann. Verursacht ist dies durch Dämpfung des Radarstrahls durch große Tropfen oder Hagel in Starkechobereichen, die vom Radar aus gesehen am Vorderrand des angezeigten Gebietes liegen.

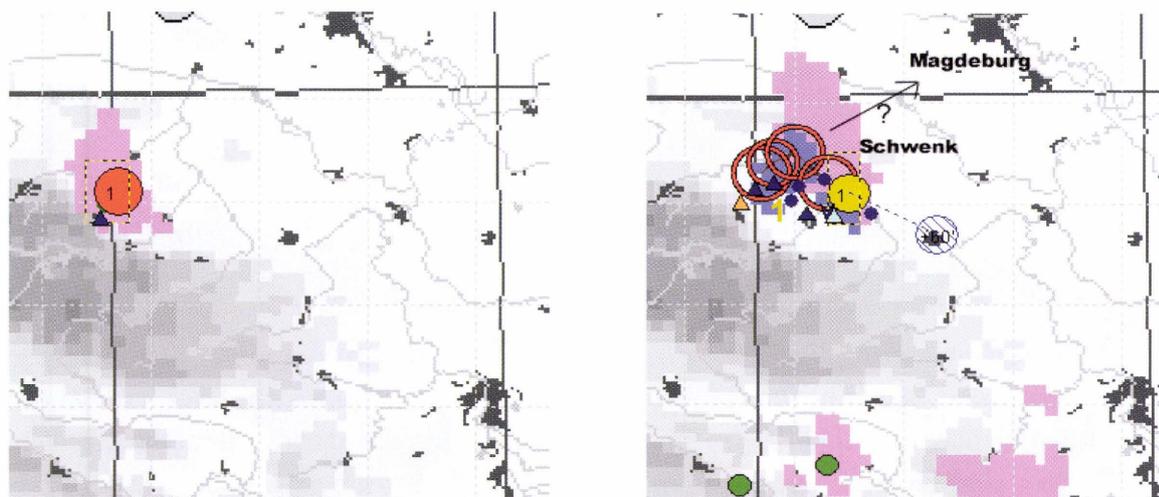


Abb. 5: Primärzelle, die beim ersten Auftreten bereits im Entwicklungsstadium "rot" eingestuft wurde, mit kleinem Kernrahmen und Hagel-Warnstufe 2 am Harz (links, Radar Berlin 7.7.01, 15:58 UTC, KONRAD PZ, Raster ca. 19km) als Kennzeichen für eine schnelle Entwicklung innerhalb 15 min. Änderung der Verlagerungsrichtung eines langsamen Zellkerns 1 zu einem südlicheren Schwerpunkt (im konvektiven Zelniederschlagsfeld, violett) nach 45-minütiger geradliniger Verlagerung (rechts, 16:13-17:13 UTC, KONRAD PZ)

5.3 Pseudozellen

Lange stand die Existenz von ANomalous PROPagation (ANAPROP) und das Risiko, daraus unechte Zellen automatisch zu analysieren, dem operationellen Nutzen von Zellanalysen entgegen. Dabei erzeugt eine stärker gekrümmte Strahlausbreitung Bodenechos, die bei einer als normal angenommenen Strahlausbreitung sehr hochreichend bis abgehoben erscheinen. Diese Situationen kommen bei Inversionswetterlagen oder extremen Feuchtesprüngen in der bodennahen Atmosphäre zustande. Ein Beispiel solcher Pseudozellen ist in Abbildung 6 zu sehen.

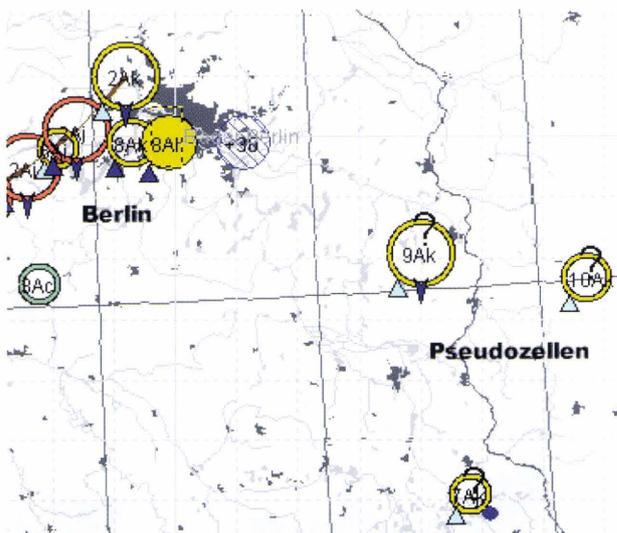


Abb. 6: Pseudozellen (7, 9, 10) und reale Zellen (2 u. 8) in 1 Stunde im Radarbereich Berlin, KONRAD PZ, 17.8.00, 01:43-02:43 UTC. Die Pseudozellen mit Hagel- und Starkregenwarnung sind von KONRAD als zweifelhaft identifiziert (siehe ?). Der Algorithmus wählt für Zelle 2 in Berlin mit NE die richtige von 2 möglichen Verlagerungen (Zelle 8, Neuzelle).

Neue Filterverfahren auf statistischer oder Doppler-Basis eliminieren viele, aber nicht alle dieser Bodenechos. Auch höhere Echowerte kommen vor und können durch ein "in die Norm-Höhe ziehen" schlanke Zellen bis z.B. 6 km Höhe oder mehr vortäuschen. Solche Pseudozellen sind stationär, mit häufigen, unrealistischen Starkregenwarnungen, und können vom erfahrenen KONRAD-Nutzer leicht erkannt werden.

Zur automatischen Erkennung von Pseudozellen wurde im KONRAD PZ eine Definition eines Vertikalgradienten entwickelt, die über 3 Höhenstufen die Echoabnahme um ca. 18 dB als niederschlagsuntypisch erkennt. Im Nahbereich der Radarstation kann im Zellkern ein extremer vertikaler Echogradient vorgetäuscht werden, weil der Gipfel der Zelle über den steilsten Abtastwinkel hinaus nicht mehr erfasst wird. Dies erscheint jedoch selten und ist vernachlässigbar. Viele solcher vermeintlichen Pseudozellen werden in KONRAD markiert und das Auftreten von ANAPROP-Situationen und Sektoren damit allgemein dokumentiert.

Es gibt aber noch weitere Gründe für Fehlortungen. Gelegentlich wurden Zellen mit wenigen Kernpixeln ($<15 \text{ km}^2$), aber mindestens einem hagelverdächtigen Pixel ($>55 \text{ dBZ}$) zunächst auch als Primärzelle eingestuft, worunter sich dann einige extrem schlanke Pseudozellen befanden. Ausgelöst werden sie wohl von Masten, Bauwerken und z.B. Schiffen auf den Ostsee-Schiffsrouten. Letztere ließen sich teilweise über den vertikalen Echogradienten markieren. Die Identifikation ist in den 2D-Produkten KONRAD PX allein nicht möglich, wenn man von dem Zweifel an Pseudo-Hagelzellen mit wenigen km^2 Basis absieht.

Kleinste Zellen mit den hagelverdächtigen Einzelpixeln werden zumindest im KONRAD-PX-Produkt nicht mehr dargestellt.

6. Liste der charakteristischen Zellparameter

6.1 Hauptliste Primärzellen

Ein Ziel bei der Charakterisierung von konvektiven Primärzellen war, mit 40 Parametern je Zelle pro Zeitschritt auszukommen. Diese Listen werden alle 5 min fortgeschrieben, auf einem Server bereitgestellt und als Tagesliste bzw. 30 min Online-Paket vom Darstellungsprogramm (z.B. KORABI) abgerufen, kombiniert und bearbeitet und als Symbole auf einer Karte mit Geographiehintergrund dargestellt. Ausgerichtet auf das KONRAD PZ mit kennzeichnenden Größen aus den 12 Höhengschichten, bleiben in der KONRAD PX-Liste entsprechende 3D-Positionen unbesetzt, bzw. dienen als Testmedium für Ergebnisse neuer Algorithmen. Bei der Entwicklung hat sich bewährt, neue Algorithmen unter Verknüpfung von Listenparametern direkt auf der Ebene des Darstellungsprogramms zu berechnen und darzustellen und erst nach einer Reihe erfolgreicher Anwendungen in einen Listenplatz zu übernehmen.

Zu jedem Zeitschritt erhält jede neue oder wiederkannte Primärzelle 40 charakteristische Parameter. Vorläufig können sie noch geringfügigen Modifikationen unterliegen. Beispiele für einstündige Listen sind in Tab. 2 (PZ-Zellenanalyse) und Tab. 3 (PX-Zellenanalyse) wiedergegeben und in Tab. 4 erläutert.

Die Parameter selbst unterscheiden sich in Werten, Zählern oder nur "flags" bzw. "marker".

Zu den Parametern gehören u.a.:

- die Zell-Identifikationsnummer,
- die Ortungskoordinaten im Radarbild,
- das Zellkernstadium,
- allg. vertikale Strukturkennzeichen,
- die Warnparameter,
- die Startposition ,
- die Lebensdauer im Primärstatus,
- die Prognoseposition, und die Zugdaten,
- die Pseudozellkennung (PZ) und
- die Kernschwerpunkte sowie
- der Zellkernrahmen (Details Tab. 4).

Die Zellverlagerung bzw. Zuggeschwindigkeit wird auf 10- bzw.15 min Basis bestimmt, um durch die Streckenauflösung von 1 bzw. 2 Pixel bzw. km geringere Rundungsfehler bei den 30 min-Prognosen zu erhalten. Der Zugrichtung fällt in der Gewitterprognose generell eine höhere Priorität zu.

Die Zellkoordinaten sind in x und y positiv von der linken oberen Bildecke (z.B. PX) gezählt. Durch die im DWD verwendete stereographische Projektion 60°N/10°E sind die Pixeldistanzen nicht exakt Kilometer-Distanzen (PX) sondern um 3-7% geringer. Dies wirkt sich auch in den Zuggeschwindigkeiten (km/h statt m/s) aus. Die Starkregenvorwar-

nung mit dem Punktsymbol zählt die 5 min-Abschnitte mit 24mm/h , die in ihrer Kontinuität schließlich 12mm/30min erreichen.

Der "Slow"-Marker wird gesetzt, wenn der momentane Zellkern mit >23 mm/h gerade eine Kombination aus Verlagerungsgeschwindigkeit und Kerndurchmesser anzeigt, die durch Echoüberdeckung zu einem Starkregen führen kann.

Der Primärkern in der Kernstruktur ist die ca. 9 km^2 -Säule mit maximalem Wassergehalt oder der stärkste Hagelkern. Er liegt oftmals im südlichen "Zipfel" des Kerns z.B. im Ansatz eines Bogenechos.

Die Parameter werden z.T. nochmals bei der Besprechung der KONRAD-Produktlegende und den Warnungen erläutert.

Die meisten Listenzeilen werden zu 60min-Paketen (KONRAD PZ) oder zu 30 min Paketen (KONRAD PX) für die online Darstellung gepackt.

Auf der Basis von Listenparametern sind Übersichtsstatistiken schnell durchführbar.

PX103840107071851	0	2	0	194	128	41	0	1	0	2	1	0	0	0	194	128	0	0	0	7	194	128	0	0	0	0	194	127	0	0	0	0	191	124	197	132			
PX103840107071851	0	3	0	196	118	60	0	1	0	2	1	0	0	0	0	196	118	0	0	8	196	118	0	0	0	0	197	119	0	0	0	0	192	113	199	122			
PX103840107071855	0	3	1	194	122	111	0	3	0	6	2	0	1	182	146	192	126	0	1	0	36	196	118	3	63	54	0	1	0	193	123	196	118	0	0	189	113	199	130
PX103840107071900	0	3	2	194	120	116	0	2	0	11	2	1	-1	188	126	194	118	1	0	0	12	196	118	3	45	17	1	2	0	194	119	194	122	196	118	188	111	199	129
PX103840107071905	0	3	2	194	118	107	0	2	0	16	1	2	-1	194	106	194	116	0	0	0	2	196	118	3	270	24	1	3	0	194	116	194	120	194	122	188	111	199	127
PX103840107071910	0	3	2	195	112	39	0	1	0	21	0	1	-1	198	88	196	106	0	0	0	0	196	118	3	262	48	0	3	0	195	110	194	118	194	120	192	107	198	118
PX103840107071910	0	4	0	193	126	57	0	1	1	2	1	0	0	0	193	126	0	0	0	2	193	126	0	0	0	0	0	192	126	0	0	0	0	188	121	198	130		
PX103840107071915	0	3	2	195	113	29	0	0	0	26	0	0	0	198	98	195	114	0	0	0	0	196	118	3	258	31	0	3	0	195	112	195	112	194	118	193	109	197	119
PX103840107071915	0	4	1	193	125	43	0	1	0	7	1	1	-1	193	119	193	124	0	0	0	2	193	126	1	270	12	1	1	0	194	126	193	126	0	0	188	120	197	129
PX103840107071920	0	4	2	193	125	36	0	1	1	12	1	2	1	193	122	193	125	0	0	0	9	193	126	1	270	6	1	2	0	192	125	193	125	193	126	190	120	197	128
PX103840107071925	0	4	2	193	125	39	0	1	1	17	1	3	0	193	125	193	125	0	0	0	6	193	126	1	360	0	1	3	0	192	125	193	125	193	125	189	121	197	128
PX103840107071925	0	5	0	134	16	9	0	1	1	2	1	0	0	0	134	16	0	0	0	2	134	16	0	0	0	0	0	133	15	0	0	0	0	132	15	136	17		
PX103840107071930	0	4	2	192	124	41	0	1	1	22	1	4	0	189	121	191	123	0	0	0	5	193	126	1	315	8	1	4	0	192	125	193	125	193	125	186	119	196	127
PX103840107071936	0	4	2	191	123	31	0	1	0	28	1	5	0	185	117	190	122	0	0	0	2	193	126	1	315	17	1	5	0	190	122	192	124	193	125	188	120	194	127
PX103840107071940	0	4	2	192	123	34	0	1	0	32	0	6	0	192	120	193	123	0	0	0	0	193	126	1	270	6	1	5	0	191	123	191	123	192	124	188	119	197	127
PX103840107071940	0	6	0	164	23	11	0	1	1	2	1	0	0	0	164	23	0	0	0	2	164	23	0	0	0	0	0	164	23	0	0	0	0	162	22	165	24		
PX103840107071946	0	4	2	193	123	27	0	1	0	38	1	6	0	199	123	194	123	0	0	0	1	193	126	1	180	12	1	6	0	193	124	192	123	191	123	190	120	197	125
PX103840107071946	0	6	1	165	22	19	0	1	1	8	1	0	0	171	16	166	21	0	0	0	3	164	23	1	225	17	0	1	0	164	22	164	23	0	0	162	19	168	23
PX103840107071952	0	4	2	192	121	33	0	1	0	44	0	6	0	192	115	191	119	0	0	0	0	193	126	1	270	12	1	6	0	192	120	193	123	192	123	188	119	197	125
PX103840107071952	0	6	2	165	21	18	0	0	0	14	0	1	0	168	15	165	20	0	0	0	0	164	23	1	243	13	1	1	0	165	20	165	22	164	23	163	18	168	23
PX103840107071952	0	7	0	99	131	1	0	1	1	2	1	0	0	0	99	131	0	0	0	1	99	131	0	0	0	0	0	99	131	0	0	0	0	99	131	99	131		

Tab. 2: Musterausdruck der 40 Zellparameter (Zeile 1) von KONRAD PX am Beispiel Radar Berlin 10384 vom 7.7.01 18:51-19:52 UTC (1. Datenblock). Inhaltsdefinition siehe Tabelle 4.

Für einen Vergleich mit Tab 3 ist zu beachten, dass dort die Zeitschritte 15 statt hier 5 min betragen, dass die Ortskoordinaten (positiv, Ursprung Bildeckpunkt links oben) bzw. die Kernzentren dort im 2x2- gegenüber hier im 1x1-Raster festgelegt sind und dass die Zellkennziffern unterschiedlich sind. Neuzellen haben keine Vorläuferparameter.

Einige Spaltenwerte mit vertikaler Information analog Tab 3 (KONRAD PZ) sind hier mit Testdaten belegt (Beispiel Spalte 9: scharfer Echogradient statt Echo top).

Hinweis: Jede Zeile gilt für einen analysierten Zellkern. Aus dem PX von 18:51 Uhr wurden 2 Zellen gefunden, um 19:52 Uhr 3 Zellen.

- 0 Bildtyp, Radarstations-Id., 2Endziff, Jahr, Mon, Tag, Ausgabezeit UTC
- 1 Hilfsmarkierung
- 2 Zellen Identifikationsnummer (1-999)
- 3 Status Erkennung: 0=neu, 1=erste, 2=zweite und weitere Wiedererkennung
- 4 Mittelpunkt Zellkern, y-Koord. (hier Bildkoordinatenu sprung li. ob. Ecke, d.h. x u. y zählen nach rechts und unten positiv
- 5 wie 4), x-Koordinate Zellkernzentrum
- 6 Anzahl Zellkernpixel Radarreflektivitätslevel 5 (rot), >46 dBZ
- 7 dimensionslose Zahl, analog Zellkernvolumen (*10 ktons im PZ) , bzw. dessen Wassergehalt
- 8 Zellstadium bzw. -kategorie, Stadien 0-3
- 9 PX: Flag für scharfen Echogradienten (lev6->lev0 in 3km), PZ:Zelltophöhe ü. Radar; 13 bedeutet 12km-Reflektivität >lev3; höheres Zelltop erwartet *
- 10 Lebensdauer der Zelle in min, mit 2 (PZ=5) Startminuten Neuzelle und Zeitentsprechung Bildausgabezeiten
- 11 Hagelwarnzähler 0=keine, 1=Hagelwarnung Stufe 1 (Apix6>0), 2=Stufe 2 (PX: APix6>12, PZ:APIX6>8), unterliegt Modifikation
- 12 Starkregenzähler, ähnlich 11), PX: bei =2: Starkregenvorwarnung 1; bei 3-6 Starkregenvorwarnung 2, PZ: 15min Zugbahn< kleinerer Kernkreisflächenradius, vpix15<lev6-Quadratseite u. Ha6+=0
- 13 Kernpixel Trendentwicklung, 0, +1,-1, Pixeländerung lev5 um +-20/5min, PZ: Masseänd. +-20, Säule +-7 Pix lev6, Top +-3km
- 14 Prognose Zeitposition, y-Wert für +30 bzw. +60 minuten (+60, falls life(10)>60 min), sonst standardmässig +30 min
- 15 wie 14), x-Wert
- 16 Wie 14), y-Wert, nur Vorhersageposition 1 Zeitintervall Zi, PX: +5min, PZ: +15 min
- 17 wie 16), x-Wert
- 18 Prognose Hagelwarnmarker 0=keine, 1=Hagelwarnung, basiert nur auf letzte 2-malige Wiederholung, eingeschränkt nutzbar
- 19 Prognose Starkregenmarker, 0=keine, 1= Starkregen (>12 mm/30min), z.Z. bei PX stillgelegt
- 20 Anzahl der lev6-Elemente (>55 dBZ, ca 1km3) im Zellkernvolumen 7) *
- 21 >55dBZ-Elemente oberhalb von 6.5km Höhe ü. Gr., sichererer Hagelindikator *
- 22 Anzahl der lev6-Pixel im Kern (>55 dBZ)
- 23 Zellkernkoordinate, y-Wert des Erstkontaktes der aktuellen Zelle
- 24 wie 23), x-Wert
- 25 Maximales Stadium 3) im bisherigen Zellablauf
- 26 letzte Zellbahnrichtung in 360°-Einteilung
- 27 letzte Zugeschwindigkeit in PX-Pixeln/Zeitintervall 1h, Pixelwert stimmt mit km-Wert bis auf 7% überein, Vektor in der M30 Prognose ist genauer
- 28 SLOW-Marker, wenn Relation momentaner Zellkerndurchmesser/Zugeschw. anhaltend zu Starkregen führen könnte
- 29 Zähler für HAW 11) im bisherigen Zellablauf
- 30 Marker für Pseudozelle und ANAPROP-Verdacht, letzte Version: 0=Regenzelle, 1=ANAPROP mögl., 2=ANAPROP wahrscheinlich (ausser Innenring r<25 km am Radar) *
- 31 y-Koordinate des gewichteten Primärkernmittelpunktes 9x9 pix, (Schwerpunkt, Säulenmasse), früher Primärkernvolumen
- 32 x-Koordinate des gewichteten Primärkernmittelpunktes 9x9 pix, (Schwerpunkt, Säulenmasse), früher y-Koord. Primärkern
- 33 Zellkernmittelpunkt Vorgängerposition, y-Koordinate analog 4) (z.B. -5min), früher x-Koord. Primärkern
- 34 Zellkernmittelpunkt Vorgängerposition, x-Koordinate analog 5) (z.B. -5min), früher Sekundärkernvolumen
- 35 Zellkernmittelpunkt Vor-Vorgängerposition, y-Koordinate analog 4) (z.B. -10min), früher y-Koord. Sekundärkern
- 36 Zellkernmittelpunkt Vor-Vorgängerposition, x-Koordinate analog 5) (z.B. -10min), früher x-Koord. Sekundärkern
- 37 x/y-Zellkernrahmen zur horizontalen Zellkernstruktur, y-Anfang
- 38 wie 37), x-Anfang
- 39 wie 37), y-Ende
- 40 wie 37), x-Ende
- * im PX testweise: Böenwarnflag 1,0
- * in PX-Radarbildern keine Daten hierzu, (anders genutzt oder 0 gesetzt)

Tab. 4: Erläuterungen zu den 40 Parametern (1. Spalte, Kopfzeile in den vorigen Tabellen) der KONRAD-PX-Listen und KONRAD-PZ-Listen, Stand 6/2001

6.2 Ergänzungsliste

In der weiteren Entwicklung von KONRAD zeigte sich, dass zusätzliche zu den 40 Listenparametern erforderlich schienen, v.a. auch Pixeldaten unvorhersehbarer Größe und Anzahl. So wurde eine Ergänzungsliste definiert, die jeder Hauptliste nachgeschaltet ist. Sie beinhaltet die im Standardprodukt PL der letzten Volumenabtastung (15-minütig) enthaltenen Hagelwarnungen mit der Bedingung Reflektivität ≥ 46 dBZ in 1,4 km oberhalb der 0°-Grenze. Dies ist gleichbedeutend mit mindestens einem KONRAD-Zellkernpixel bis in diese Höhenschicht (meist bis 5 km Höhe). Diese Bedingung wird meist früher erreicht als eine KONRAD-PZ-Hagelwarnung mit 55 dBZ.

Weiterhin sind die Positionen sog. Sekundärzellen gespeichert, die die Vor- oder Endstadien von erwarteten Primärzellen lokalisieren, oder lange Zeiträume der Stagnation der Entwicklung beschreiben. Diese Zellen sind im Idealfall durch Säulen konvektiver Niederschlagskerne -in der Schicht 4-6 km- mit typischerweise 4 mm/h (und < 70 mm/h) repräsentiert, deren Zellbasis < 100 km² ist. In KONRAD PX (5 min, 2D-Produkt) sind daneben auch Schauerkerne ohne deutliche vertikale Streckung darunter, die zumindest als Tracer für die allgemeine Zugrichtung zu verwenden sind.

In Ergänzung zu den Sekundär- und Primärzellen sind in dieser Liste die genaueren Starkregenpositionen im Raum angegeben, gegenüber der bloßen Zellkennzeichnung mit Starkregenpotential. Dabei werden die Reflektivitätsstufen der 6 Radarbilder und der jüngsten 30 min "übereinandergelegt" und die Mittelwerte der Regenintensitäten summiert und bzgl. ihres Anteils bzw. Erreichung des Richtwertes 12mm/30min als starkregengefährdend eingestuft und als Flächenpixel markiert. Vereinzelt kommen kleine Starkregengebiete sogar unabhängig von Primär- und Sekundärzellen vor. Ursprünglich sollten nur Pixel markiert werden, die mit Sicherheit bereits Starkregen 12 mm/30min an jenen Orten ausgebildet hatten. Diese haben recht gut mit entsprechenden Starkregenzonen in den PH-Bildern übereingestimmt.

Ergänzend werden in die KONRAD-Darstellung die Echofelder mit konvektivem Niederschlag (nur zum aktuellen Zeitpunkt) aus dem Radarbild direkt übertragen, nämlich Niederschlagsfelder, die als Klassenwert typischerweise > 4 mm/h aufweisen und noch zum Umfeld von Zellen gehören. Sie sollen zeigen, ob Zellen in Verbänden wie Gewitterlinien untereinander gekoppelt sein könnten und z.B. gemeinsame Böenfronten haben. Auch markieren sie vorweg den Beginn von Entwicklungen und die Einbettung von Sekundärzellen.

Diese Ergänzungslisten dienen also dazu, die Vielfalt und Stadien der Zellentwicklung breitgefächert darstellen zu können.

7. Warnphilosophie und Warnalgorithmen

Die Warnungen in KONRAD sind ausschließlich auf ausgeprägt konvektive Ursachen abgestimmt, sie sind meist zellenbezogen und definitionsgemäß, von der Zielsetzung der Vollständigkeit her, meist mit einer Fehlwarnungstoleranz versehen. D.h. alle Warnzustände sollten erfasst und als Hinweise dargestellt werden. Meist sind Schwellwerte überschrit-

ten, um eine ein- oder mehrstufige Warnung zu aktivieren. Eine Verfeinerung der Warnschwellen oder Anpassung an Vorgaben ist durch die standardmäßige Klassifizierung der bisherigen Basisprodukte nicht leicht möglich.

Die Warnungen sind entweder zellbezogen (Kernstadium, Hagel), oder greifen auch ins Kernumfeld (Böen) bzw. entlang dessen Zugbahn (Starkregen).

7.1 Hagelwarnung

Eine ausführliche Zusammenstellung über Hagelcharakteristiken ist bei *Morgan und Summers (1986)* nachzulesen.

Die Hagelwarnung orientiert sich an der Wahrscheinlichkeit der Existenz von größeren Tropfen und/oder Eisteilchen v.a. deutlich oberhalb der 0°-Grenze und oberhalb der Bildungsschicht verschmelzender flüssiger Wassertropfen (Koaleszenz). Im Bereich der -18°C-Isotherme, also in etwa 6 km, ist die 0°-Höhe meist um mehr als 3 km überschritten und damit folgt für ein 45 dBZ-Echo eine Wahrscheinlichkeit von ca. 60% mit Hagel am Boden (*Witt et al. 1998*), bei 4 km bereits ca. 80%.

In den Radarprodukten beginnt die nächste Reflektivitätsklasse bei 55 dBZ (das ist ein Faktor 10 höher). Wird diese Echostärke in 6 km Höhe gefunden, so kann mit deutlich größerer Sicherheit die Existenz von Hagel oder von größeren Hagelkörnern gefolgert werden, was in KONRAD durch eine intensivere Hagelwarnung angezeigt wird. Da die Streupartikel mit Wasserhaut bzgl. ihrer Größe mit D^6 (D: Durchmesser) an der Reflektivität beteiligt sind, werden auch schon wenige größere Eisteilchen über einen Echoschwellwert (55 dBZ) in den meisten Fällen erkennbar.

Des weiteren wird zur Identifikation von Hagel in der Fläche seine deutlich höhere Wahrscheinlichkeit (ca. Faktor 7) gegenüber einem entsprechenden Starkregenecho verwendet. Letztere Häufigkeiten wurden aus 23 Jahren Ombrometerdaten des MOHp abgeleitet. Dabei wurde die Kernfläche mit Extremechos und die Zuggeschwindigkeit so miteinander verknüpft und standardisiert, dass der Starkregenfall in mm/Zeiteinheit unwahrscheinlicher gegenüber einem durch Hagelkörner angehobenen Regenecho (D^6) erscheint.

Wenn z.B. eine Regenintensität von (mehr als) 80 mm/h (>55 dBZ) für etwa 5 min anhält, dann kommt dies am Ort etwa alle 2 Jahre einmal vor. Dem gegenüber steht bei gleichem Echowert eine Hagelhäufigkeit von ca. 3-4 Hageltagen im Jahr (MOHp), also etwa 6-8 mal häufiger. Somit ist ein Überstreichen eines Punktes mit >55 dBZ Reflektivität für 5 min eher hagelwahrscheinlich als starkregenwahrscheinlich. Die Zuggeschwindigkeit wird aus KONRAD genau eingesetzt, oder als Schätzung mit <50 km/h und 16 km² Extremreflektivität (>55 dBZ) als für eine Warnung erfüllt betrachtet.

Näherungsweise kann auch die grobe Beziehung der MOHp-Ombrometerstatistik von

$$R > 24 \cdot t + 4, \text{ mit } R \text{ in mm und } t \text{ in Stundenanteil } (<0,4),$$

für Radar R als Indikator für einen wahrscheinlichen Hagelanteil angewandt werden.

Die Mess-Diskontinuität des Radars (5 min Takt) spielt hierbei keine Rolle, da der Innernern mit >55 dBZ als ziehende Fläche erfasst wird und somit auch im 2D-Produkt PX als Hagelwarnung funktioniert.

Die obigen Untersuchungen ließen auch Zweifel an den hohen Starkregenwerten auf der Basis einer Marshall-Palmer Z/R-Beziehung aufkommen, da deren örtliches Auftreten er-

fahrungsgemäß im Radar häufiger erscheint als die der 23-jährigen Ombrometerstatistik entsprechenden Werte. Als Konsequenz daraus wurde ein Abtrennen der Z/R-Transformation starkkonvektiver Echos von den häufigeren stratiformen verfolgt (mehrfache Z/R-Beziehung).

Ergänzend sollten auch kleine Sekundärzellen mit einem 55 dBZ-Pixel in Bodennähe in die Primärzellenklassifizierung aufrücken. Diese sind bei sehr kleinen Volumina oft stör-echobeeinflusst (siehe auch "Pseudozellen"), d.h. es gibt kaum kleinste Zellen ($<15 \text{ km}^2$ Kernfläche) mit bereits einem hagelverdächtigem Pixel.

Die Hagelwarnstufen 1 und 2 (siehe Legende) sind für die ersten Verifikationserfahrungen einerseits und andererseits für eine abzuschätzende Beteiligung größerer Korngrößen eingeführt worden. Letztere sollte sich in bodennahen Reflektivitäten $>59 \text{ dBZ}$ und extremen Echos in der Echotop-Region ausdrücken.

Für die genauere Beurteilung der Hagelwarnung muss berücksichtigt werden, dass z. Z. nur alle 15 min ein Volumenscan verfügbar ist, aus dem die Hagelwarnung relativ zuverlässig abzuleiten ist. In den Zwischenzeiten stehen nur die 2D-Scans zur Verfügung, aus deren Zellkernen der Hagel nur über Echostärke und Innenkerndurchmesser klassifizierbar ist.

Im Versuchsstadium befinden sich noch Schlussfolgerungen auf Hagel aufgrund von extremen horizontalen Echogradienten innerhalb eines max. 3 km Umfeldes von 55 dBZ Echos (PX-Listenposition 9) und die Erkennung von abgrenzbaren Hagelreservoirs in der oberen Wolkenhälfte. Dabei wird davon ausgegangen, dass größere Hagelkörner $>1 \text{ cm}$ entsprechend ihres Schalenbaus durchaus länger als 15 min als solche identifizierbar sind ($>55 \text{ dBZ}$). Eine durch Scherung angenäherte und schließlich abgetrennte Up- und Downdraftströmung mit dem Ergebnis einer abgesetzten anhaltenden Zirkulation könnte den Wachstumsprozess mit Klareisanlagerung (Downdraft, Extremecho) und Wiedereinstieg in den Updraftzyklus als abgesetzt erkennbar werden lassen. Dabei könnten 55 dBZ Echosäulen oberhalb 6 km ohne eine Durchsetzung bis zum Boden eventuell ein Indikator sein, wenn sich große Teilchen formieren bzw. zirkulieren, ohne als kontinuierlicher Fluss kleinerer Teilchen bis zum Boden zu reichen. Ein ein- oder zweimaliges Erkennen solcher Extremechoreservoirs, die bei dem Hagelunwetter am 17.7.00 im Raum Donauwörth zu beobachten waren, könnten auf große Hagelkörner hinweisen (Hagelstufe 3, Vorwarnung). Diese Zusammenhänge bedürfen aber einer weiteren Bestätigung.

7.2 Starkregenwarnung

Die Starkregenwarnung kann als qualitativ beste aller Warnungen auf Radarbasis eingestuft werden, wobei die Klassifizierung in konvektive Reflektivitätsstufen gegenüber der genauen Reflektivität in dBZ nicht entscheidend war. Hierzu gaben die "Vorab-Verifikation" der Starkregenzellen an den Orten mit Starkregen ($>30 \text{ mm/h}$) im PH-Produkt ermutigenden Anlass. Die erste zellenbezogene Starkregenabschätzung mit dem Richtwert $12\text{mm}/30\text{min}$ fußte auf Zellkernkreisflächen und wiederholte Überlappung des Zellkerns mit $>23\text{mm/h}$ zu folgenden Zeitschritten. Eine 10- bzw. 15 min Kontinuität löste erste (Vor-)Warnungen aus.

Die Symbolstufen (siehe Legende, Abschnitt 9.1) waren somit im ersten Ansatz Entwicklungs- bzw. Zeitstufen. Hierbei erschienen die Warnungen nur sehr restriktiv und nur an erkannten Primärzellen.

Das Zeitfenster des Richtwertes 12mm/30min resultierte aus eigenen Statistiken, wonach in Radarprodukten die meisten Starkregenkerne in weniger als 25 min ihr Ergiebigkeitsmaximum mit Warnbedarf entwickeln.

Daraus folgt praktisch eine Andauer für Starkregen aus dem Verhältnis Kerndurchmesser/Zuggeschwindigkeit. Die 12 mm bestimmen sich aus dem Schwellwert von >46 dBZ über die für den starkkonvektiven Bereich verwendete Z/R-Beziehung $Z=139 \cdot R^{1.8}$ (Lang, 1999).

Ergänzend werden die wirklichen Starkregenzonen durch die max. 30 min andauernden Überlappungen von Reflektivitäten angezeigt. Hierbei spielen v.a. die überwiegend hagelfreien Intensitäten von 4-80 mm/h eine Rolle und ihre pixelweise Überlappung. Dabei wurde versucht hagelbeeinflusste Reflektivitäten bzgl. ihrer Regenintensität zu begrenzen. Die maximale Regenintensität ist auf 54 dBZ limitiert, entsprechend etwa 70 mm/h, ohne die obengenannten Hagelidentifikationen (55 dBZ-Kerndurchmesser, -Höhe) im Einzelnen zu berücksichtigen.

Zunächst wurde die Philosophie der garantierten Überschreitung des Richtwertes 12mm/h realisiert, bis die Nowcasting-Nutzer eine Vorlaufzeit unter Akzeptanz zunehmender Fehlwarnungen verlangten. Somit wurden statt Schwellenuntergrenzen Mittelwerte und eine zeitlich vorverlegte Warnauslösung realisiert. Die Überlappung von Echos und Intensitäten im 5 min Takt ist mit einem Übereinanderlegen von PX-Radarbildern und der pixelweisen Regenbilanz zu vergleichen. Dabei ist das Szenario zwischen dem 5 min Takt unbekannt und trotz Zellfluktuation als gleichbleibend angenommen.

Ein "Nachschleifen" dieser Gebiete auf der Zellzugbahn mit 30min-Starkregen in der vergangenen Stunde, wie im KONRAD-PX-Online-Produkt, rührt von zeitlich und örtlich weiter zurückliegenden, dominierenden Echos >55 dBZ her. Der meist entscheidende Faktor beim Starkregen ist weniger eine Intensitätssteigerung als eine Kernexpansion und v.a. eine Verlangsamung der Zuggeschwindigkeit der Zelle. Hierfür kommen als Ursache topographische Gegebenheiten, schwache Höhenströmung, wie auch zunehmende Zellrotation in Frage.

Diese Starkregenwarnung ist sicherer, wenn keine hagelverdächtigen Echos beteiligt waren. Sie kann als Pixelfeld auch isoliert auftreten, ohne dass an diesen Stellen Primärzellen identifiziert wurden. Die Starkregenspur deutet auf eine gewisse Kontinuität (und Prognosechance) hin. Gleichzeitig können kleinere Zellen ohne Starkregen ablaufen.

7.3 Böenwarnung

Eine Böenwarnung war zunächst nur testweise für die Nutzergruppe Feuerwehren versucht worden, erwies sich später aber als brauchbare erste Näherung, die es in künftigen KONRAD-Versionen noch zu verbessern gilt. Sie beruht weitestgehend auf einer Ableitung aus Begleiterscheinungen und noch nicht auf Wind-Meßdaten.

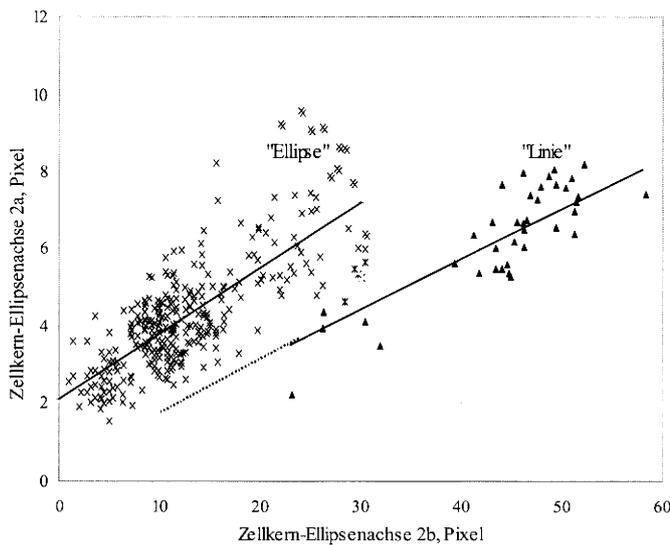


Abb. 7: Die Unterscheidung gestreckter linienförmiger, (Achsenverhältnis $>5:1$) gegenüber angenähert elliptischer Zellkernstrukturen am Beispiel aller KONRAD-PX-Zellen des 17.8.00 im Raum Berlin

Die Notwendigkeit, häufiger als in 15 min Takt Windaussagen zu haben (wie im DWD-Dopplerzyklus, nicht alle Standorte) führte zu einer fünfminütigen Böenableitung, basierend auf einer groben Schwellwertüberschreitung. Aus markanten Böenschäden und den beobachteten Radarstrukturen sind folgende drei Warnindikatoren definiert worden:

Schnellziehende Zellen:

Zieht der Kernmittelpunkt (zusätzlich einer möglichen internen Umschichtung) mit >63 km/h (Beaufort 8) so wird bei eindeutiger Zellkontinuität und Kaltluftausfluss eine recht sichere Böenwarnung initiiert (5 min KONRAD PX). Einige mit KONRAD nachgeprüfte Tornados (www.tordach.org) entstammten solchen schnellziehenden Zellen.

Zellkerne mit Linienstruktur:

Daneben hat sich bei Böenschäden auch gezeigt, dass manchmal Linienformationen im Kernniederschlag (>23 mm/h) beobachtet wurden. Diese sollten als Warnindikator mindestens 19 km lang sein und ein Ellipsen-Achsenverhältnis von $>5:1$ aufweisen (Abb. 7). Der Versuch, klassische "bow-echos" als gebogene Linienformation, evtl. auch kleineren Ausmaßes zu finden, schlug fehl, so dass nur die besser erkennbare, längere Linienformation übrigblieb. Die größere Böenintensität bei Linienformationen wurde von erfahrenen Vorhersagemeteorologen bestätigt (Freuer, 2002, pers. Mitt.)

Ausgeprägte Hagelzelle:

Als dritter Indikator werden großvolumige, hochreichende Hagelzellen mit Obergrenze > 10 km mit ihren durch Schmelzvorgänge unterstützten Fallwinden als potentiell böengefährdend eingestuft. Hier muss auch mit einer hohen Rate an Fehlwarnungen am Ort gerechnet werden.

Diese Böenwarnungen müssen besonders verifiziert und noch verfeinert werden.

8. Prognoseansätze

Für den Nutzer von KONRAD ist die Frage nach der künftigen Lage eines Unwetterzentrums und der zu erwartenden Intensivierung oder Abschwächung von enormer Bedeutung. Mit dem Radar kann prinzipiell nur die augenblickliche Situation erfasst und dargestellt werden. Etwaige Hinweise zur künftigen Lage lassen sich aus der Extrapolation der bisherigen Zugbahn finden. Eine Prognose des Entwicklungsstadiums bzw. der gewarnten Wettererscheinungen muss dagegen aus allgemeinen meteorologischen Erfahrungen abgeleitet werden. Unwetter mit ihren heftigen Wettererscheinungen lassen sich mit physikalischen Modellen erst ansatzweise beschreiben, wobei systematische Untersuchungen dazu nicht herangezogen werden können. In der praktischen Anwendung bei KONRAD wird daher pragmatisch vorgegangen, wie im Folgenden beschrieben. Der Nutzer sollte sich daher immer bewusst bleiben, dass überraschende Neuentwicklungen auftreten können.

Gereifte Zellen im KONRAD-Primärstatus, mit einer häufigen Lebensdauer von <30 min, erschweren alle Prognosen grundsätzlich. Die Lageprognose für nominell +30 min ist in KONRAD eine reine Extrapolation der letzten 10 bzw. 15 min Verlagerung der Zelle. Ältere Verlagerungen bzw. längere Zeiträume fließen nicht mit ein. Da nur das Kernzentrum als Punkt verlagert wird, muss beachtet werden, dass entlang der Verlagerungslinie die momentane (sich zusätzlich unbekannt ändernde) Zellstruktur in der Ausdehnung des Zellrahmens zieht.

Eine erwünschte 60 min Verlagerung findet nur für die Zellen statt, die aufgrund einer erreichten Lebenszeit von >60 min ein gewisses Regenerationspotential bereits nachgewiesen haben. Hierbei sind die prognostizierten Warnsymbole nur als Anhaltspunkte zu verstehen.

Die Prognose des Entwicklungsstadiums wird mangels praxisnahem Entwicklungskonzept trotz einer Trendaussage (Tab. 4, Nr. 13) vermieden; die Prognose von Warnparametern wird nutzerorientiert mehr der Vollständigkeit halber versucht (Alternative: für den Nutzer werden aktuelle Warnungen nicht fortgeführt). Die Hochrechnung des jüngsten Entwicklungsstadiums von 5 auf 30 Minuten zur Prognostizierung einer markanten Kernexpansion hat sich wegen natürlicher Kurzzeitfluktuationen nicht bewährt.

Die Böenwarnungen werden, einmal erkannt, weit voraus fortgeführt auf der Basis einer kontinuierlichen "schnelle Zelle" oder "Linienstruktur".

Die Hagelwarnungen werden bei mindestens zweimaligem jüngsten Auftreten fortgeführt und als Warnsymbol am Prognosepunkt + 30 Minuten angezeigt.

Die Starkregenwarnung kann fortgeführt werden, wenn sie zweimal jüngst erschien und an mehr als einer Zelle gleichzeitig ("verbreitet", strömungsbedingt) vorkommt. Hier werden noch Modifikationen nötig werden.

Jede weiter verbesserte Prognose wird einerseits die jüngste, evtl. sich ändernde oder andererseits die besonders konsistente Entwicklung der Zelle in den letzten 30 min bzgl. Stadium, Warnpotential, Zugbahn und eventuelle Nachbarzellen beinhalten müssen, also ein umfassendes Bild der Zellsituation (wie in der KONRAD-Online-Darstellung). Mesoskalige Modellierung würden hier über eine Schnittstelle Modell – Radar weiterhelfen, sind aber nicht Bestandteil der ersten KONRAD-Version.

9. Darstellung von KONRAD[©]-Parametern und -Informationen

Die Grundidee bei der Darstellung war, die bisherige Darstellungsform von Radarbildern zu verlassen und die Zellzugbahnen und Warnhinweise für einen breiteren Nutzerkreis über Symbole zur Verfügung zu stellen. Die Nutzer der KONRAD-Darstellung sollten gleichermaßen aus einem fachinternen, aber auch aus einem fachexternen Kreis mit regionalen Sicherungsaufgaben stammen. Beide Nutzergruppen legen Wert auf die ergänzende Versorgung mit den üblichen Radarbildern (PX, PL, PC).

Von den beiden Radarprodukten KONRAD-PZ und -PX sollten je 2 Darstellungsvarianten möglich sein, wobei das Online Produkt die 60- bzw. 30 min-Historie der Zellentwicklung mitbeinhaltet oder im Überblick v.a. die Zugbahnen mit Zeitcodes an den Positionen und Warnungen (ohne Zusatzparameter der Ergänzungsliste) sichtbar werden.

Bei den Zugbahnen eines ganzen Tages wird sofort augenfällig wann und wo Gewitterzellen im Primärstatus aktiv waren. Auch Fehlzuordnungen oder Zellsplitting, Tochterzellen und Entwicklungsmaxima sind schnell zu analysieren. Solche Tagesdarstellungen dienen mehr dem Verständnis übergeordneter meteorologischer Abläufe. Sie können beispielsweise Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Orographie sichtbar machen. Auch die gegenseitige Beeinflussung zweier nahe beieinander stehender Gewitterzellen kann in solchen Tagesdarstellungen besser sichtbar werden.

9.1 Symbole und Legende der KONRAD[©]-Darstellung

Die Legende (Tab. 5) ist universell im KONRAD-PZ- wie im -PX-Produkt genutzt.

Die Zellsymbole sollten alle wichtigen Informationen umfassen, die man zur Bewertung der Primärzelle, ihres Warnstatus und der Prognose benötigt. Daneben sollten auch die Vor- und Endstadien dieser Zellen in der kontinuierlichen Online-Analyse sichtbar werden, in ihrem Status als Sekundärzellen.

Im Sommer sind für lange Zeiträume die KONRAD-Produkte nahezu leer, was die Aufmerksamkeit der Nutzer reduziert; auch deshalb wurde die Regenüberdeckung $>lev3$ ($>2\text{mm/h}$) der üblichen Radarbilder (sowie die Schaltmöglichkeit auf die Radarbilder selbst) und eventuelle Schauerkerne bzw. Sekundärzellentwicklungen mit in die KONRAD-Darstellung aufgenommen.

Trotzdem sind in Phasen turbulenter, dichter Gewittertätigkeit v.a. die wesentlichen Aktivitätszentren von Primärzellen herauszulösen, die Aufmerksamkeit auf sie zu lenken und die Symbolstruktur knapp, klein und übersichtlich zu halten.

Legende		
	Zellkern(12), aktuell bzw. alt Zellkernringgröße 1-4 Stadium: grün,gelb,rot,violett	Primärkern, aktuell, zurückliegend (1)
	Verlagerung: ° km/h Zell-Nr...12, Zeitcode Df Echotrend +(-),Warnungen	Warnungen, zellbezogen, Zeitcode (2)
	Lageprognose +30' (+60')	Prognosekreis Kernzentrum (3)
	Zellkern-Spur bisher	Zugbahn, Spur identischer Zelle (4)
	Hagelwarnstufe 1,2,3,Prog.	Hagelwarnstufen (5)
	Böenwarnung(abgeleitet)	Böensymbol (7)
	Starkregen >10mm/30min Warnstufe 1, 2, Prognose	Starkregenwarnstufen, Pixelfeld (6)
	Starkregenwarnung akt. Niederschlag >2mm/h	Ndschlg. Zellumgebung, Formation (10)
	wahrer Zellkernrahmen	Rahmen Zellkernstruktur, 23mm/h (8)
	Erstkontakt Zellkern 12	Herkunftsort Primärzelle (9)
	Sekundärzellen, alt, aktuell	Sekundärzellen, zurückliegend, akt. (11)
	Zelldämpfungsstrahl > 3dB	Dämpf.strahl (PX), Pseudozelle?(PZ) (12)

Tab. 5 : Legende des KONRAD-PX-Produkts mit Symbolen, Abstufungen, Kurzerklärung und einer Kennziffer, die auf den nachfolgenden Text verweist.

Primärkern (1):

Die Legende zeigt die (1) Primärzellenmarkierung als eine farbige Kreisscheibe in Kern- bzw. Volumengrößen, wobei die Farbe dem jeweiligen Entwicklungsstadium entspricht. Sie erscheint als Ring, wenn die Positionen zurückliegen und zur 30 min (60 min) Historie der Zelle gehören. Die Zelle erhält eine Identifikationsnummer, die nach einem Zweistundenabschnitt ohne Primärzellen erneut vergeben werden kann.

Information am Zellkern (2):

An dem Zellkreis, zentriert am Kernmittelpunkt, sind an einer festen Position die aktivierten zellbezogenen Warnsymbole (2) dargestellt. Zudem weist die Zelle zeitweise einen "Echotrend" (i.A. ± 20 Pixel/Zeiteinheit) auf, der aber noch nicht groß genug ist für den Wechsel des ganzen Zellstadiums und mehr die Fluktuation des Zellkerns beschreibt. Nur im Auflösungsstadium ist ein abnehmender Echotrend häufiger und plausibel.

Schließlich sind die aktuelle 360°-Zugrichtung und die -geschwindigkeit der Zelle angegeben, abgeleitet aus 10-15 min (in km/h). In den Offline-Zellzugbahnen, die mehr als die online 30 min beinhalten, ist zusätzlich zur Zell-Id.-Nummer ein Zeitcode in Form eines Zweibuchstabencodes angegeben, der für ca. 11 Stunden (PX) oberhalb der Legende ablesbar ist.

Prognose Kernzentrum (3):

Die Prognose der Zellposition (3) in +30 oder +60 min wird durch unterschiedliche Symbole bzgl. des Zellzentrums und Zellkreis gekennzeichnet. Diese Endpunkte können den Bildrahmen der KONRAD-Darstellung am Rand verlassen. Die +60 min Prognose erfolgt nur für Zellen mit absolvierter Lebenszeit >60 min. Die Prognose von Warnzuständen (offene Symbole) basiert nur auf dem wiederholten und verbreiteten Auftreten der höheren Warnstufe und ist daher entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

Bahnspur des Zellkerns (4):

Die Zellkern-Spurlinie (4) verbindet Ringe identischer Zellen im zurückliegenden Ablauf. Da es für die "alten" Zellringe im online-Produkt keine Zeitcodefolgen gibt, zeigt die Spurverdickung den jüngeren Spurabschnitt und damit die Zugrichtung an.

Hagelwarnstufen (5):

Die 3 möglichen Hagelwarnstufen, dargestellt als farbige Dreiecke, bedeuten:

- Stufe 1 (hellblau): mindestens 1 Pixel > 55 dBZ geortet
- Stufe 2 (dunkelblau): Kern mit > 12 Pixel > 55 dBZ oder Reflektivität oberhalb 6 km Höhe > 45 dBZ (bei KONRAD PZ)
- Stufe 3 (gelb): Echoreservoir > 55 dBZ oberhalb der 6 km Schicht ohne Verbindung zum Boden. Diese Warnstufe ist noch experimentell.

Die offenen Dreieckssymbole sind entsprechend für die Prognose dieser Warnung reserviert.

Die Hagelwarnung mit Symbol wird somit z.T. erst durch die Kombination von Zellparametern (z.B. lev6-Pixel in unterster Schicht und oberhalb der 6 km-Schicht) der Hauptliste ermittelt und erst im Darstellungsprogramm aktiviert.

Starkregenwarnstufen (6):

Die Starkregenwarnung (6) markiert mit den Punktsymbolen eine zwei- oder mehrmalige Folge von Echoüberlappungen langsam ziehender Zellen (Stufe 1, hellblau bzw. 2, dunkelblau), und charakterisiert den Zellkernniederschlag (23mm/h) eines Zellkernkreises. Der Schritt-für-Schritt Schluß auf eine 30 min Konsistenz ist vereinfacht und restriktiv, so dass diese Warnung nur im Zellkern greift (Hauptliste Zellparameter, Pos. 12).

Besser ist die Prüfung der letzten max. 6 PX-Radarbilder auf lokale Überlagerungen von Starkechos mit dem Richtwert 10-12mm/30min, die dann mit dem blauen Pixelquadrat und Starkregenwarnung "ortsecht" markiert wird. Diese, nicht an Zellen gebundenen Pixel des "ortsechten" Starkregens können sich zu Feldern verdichten, die die Starkregenspur der letzten 30 min nachzeichnen (Ergänzungsliste Zellparameter).

Böenwarnung (7):

Die Böenwarnung ist aus der Zellzuggeschwindigkeit und bestimmten Strukturen der Radarreflektivität abgeleitet. Ist die Verlagerungsgeschwindigkeit in den entscheidenden Höhen (700-500 hPa) größer als Beaufort 8, so übersteigen wahrscheinliche Downdraftströmungen als vorwärtsgerichtete Böenfront diesen Schwellwert. Die Linienstruktur und der

Downburst kältester Luftpakete in hochreichenden Hagelquellen sind im Kapitel Warnungen näher beschrieben. Die Böenwarnung ist nur einstufig und stellt eine angenommene Schwellwertüberschreitung dar.

Zellkernrahmen (8):

Der "wahre Zellkernrahmen"(8) ist ein Rechteck als Umhüllende um den durch das Kreisymbol markierten Zellkern mit >23 mm/h bzw. mit Reflektivitätsstufen 5 und 6. Ist im Bild der Kreismittelpunkt gegenüber dem Rahmenmittelpunkt verschoben, so sind geringfügige Schwerpunktsverschiebungen im Kern (interner Hagelkern o.ä.) berücksichtigt worden.

Herkunftsort Primärzelle (9):

Die Bezeichnung "Erstkontakt Zellkern"(9) gibt die Position der Zelle an, an der sie erstmalig geortet wurde, wenn sie älter als 30 min (PZ: 60 min). An dieser Stelle wird eine farbige Zahl für die entsprechende Zellnummer gesetzt. Damit lässt sich ein Gesamtverlagerungsvektor bzw. die Gesamtzugbahn näherungsweise ermitteln und ggf. mit der Prognose (3) vergleichen. Oftmals liegt der Erstkontakt am Bildrand bzw. an dem 100 km-Radius.

Niederschlag Zellumgebung, Zellformation (10):

Unter "aktueller Niederschlag >2 mm/h" werden als violette Pixelflächen die Niederschlagsfelder >2 mm/h aus dem aktuellen (Ausgabezeitpunkt) Radarbild dargestellt. Diese Niederschlagsfelder in der Zellumgebung sind noch dem konvektiven Geschehen zuzuordnen und sollen Zellformationen bzw. Zellverbände mit dem verbindenden Niederschlagsfeld anzeigen. Auch umgibt er die gefundenen Sekundärzellen.

Sekundärzellen (11):

Die "Sekundärzellen" sind schwächere Zellen, die definitionsgemäß (im PZ) Kernsäulen mit typischerweise 4mm/h und mehr, zwischen 4 und 6 km Höhe erreichen. Sie sind nicht benannt bzw. verfolgbar, weisen aber auf mögliche künftige Entwicklungen hin. Im 2D-Echofeld sind damit Schauerkerne mit $>7,5$ mm/h und einem abgeschlossenem Kern <100 km² oder noch stärkere Kerne knapp unterhalb dem Primärstatus (15 km²) gemeint. Die Symbole sind somit größenmäßig etwas unterschiedlich (stärkeres Kernecho: größeres Symbol) und farblich unterschiedlichen Zeitschritten angepasst (dunkelgrün: älter, hellgrün: jünger). Letzteres ist als Anhaltspunkt notwendig, da ggf. einzelne Zellspuren aus dem Verlauf der Sekundärzellen visuell zugeordnet werden müssen. Schauerkerne nahe 2 mm/h sind nur noch schwachkonvektiv und als Zelltracer nicht mehr zu verwenden.

Zelldämpfung bzw. Pseudozelle (12):

Der sog. "Zelldämpfungsstrahl >3 dB" steht für den Hinweis auf einen regenintensiven Zellkern mit möglicher Absorption ("Niederschlagsdämpfung") und Schwächung der Radarenergie dahinter. Somit werden Zellen im "Schatten" dieser intensiven Vordergrundzelle unterschätzt, wobei 3dB eine Echoreduktion um den Faktor 2 bewirken. Dabei sind ca. 13 km Dämpfungsstrecke im Echokern > 23 mm/h Voraussetzung. Hagelverdächtige Ker-

ne werden im Echo reduziert, um den Wassergehalt besser zu erfassen. Der Zellkern ist dabei kreisförmig angenommen und die Strahlen sind mehr als Markierung denn als genaue Dämpfungsgrenze gesetzt. Bei Bewährung können künftig diese Strahlflanken genauer definiert werden. Die Dämpfungsrandbedingungen müssen je nach Praxiserfahrungen, Nutzerrückmeldungen und Verifikationen ("Schattenzellen") ggf. noch modifiziert werden. Anfangs stand ersatzweise an dieser Legendenposition im KONRAD-PZ-Produkt das "?" für einen Pseudozellenverdacht. Diese Identifikation als Pseudozelle (vertikaler Echogradient) ist im 3D PZ-Produkt recht verlässlich, im KONRAD-PX-Produkt bisher unbesetzt bei universeller Legende. Die entsprechenden Dämpfungsspeichen in KONRAD PZ werden evtl. später mit aufgenommen.

9.2 Weitere Darstellungsinhalte des KONRAD[©]-Produkts

Wie die Ausgangsprodukte PX, PZ sind auch die KONRAD-Produkte nach einer stereographischen Projektion 60°N/10°E mit den Bereichen 100 km Radius (PX) und 230 km Radius (PZ) dargestellt. Die geographischen Hintergrundkarten sind für den Nutzer entscheidend für die Zuordnung einer optimal analysierten Zellstruktur am Boden. In der derzeitigen KONRAD-Version basieren die Grautonkarten auf dem TOPOGRAPH-System des Amtes für Wehrgeophysik der Bundeswehr (AWGeophysBW), die im Rahmen eines Projektes zusammen mit einer (in Grauwerten relativierenden) Geländekarte übernommen und aus dem UTM Format angepasst wurden. Hierbei sind die Expansion und die Drehung der Radar-Polardaten berücksichtigt und eine dabei erreichte Genauigkeit von <2 km (PX) scheint vorerst vertretbar.

Die Karteninhalte (Flüsse, Städte) sind der Digital Chart of the World (DCW) entnommen, die Höhengrautöne sind relativ aber nicht absolut abgestuft (dunkler=höher).

Bei der breitenabhängigen Streckung der Daten von km auf Stereopixel ist nur der zentrale Streckungsfaktor des Radarstandortes selbst berücksichtigt (München: 1,068, Hamburg: 1,033). Die Rotation der Radardaten passt die genordeten Polardaten an den 10°E-Meridian der Projektion an. Dies wird bei den Geographiedaten nachvollzogen.

Am Zeitcode oberhalb der Legende ist vermerkt ob das Zeitintervall wegen Produktausfällen bzw. Unterbrechungen "fraglich" oder ob es kontinuierlich ist. Die KONRAD-Online-Produkte werden in einem Ringspeicher geführt und eine Offline Tagesfile wird erstellt.

10. Fallbeispiele KONRAD[®], Ergebnisse, Medienberichte

Nachfolgend sollen einige Fallbeispiele die KONRAD-Darstellung in der Praxis exemplarisch zeigen. Dabei wird versucht, die durch KONRAD vorgenommene Analyse und Dokumentation der Gewitterentwicklung anhand ihrer Auswirkungen in Medienberichten zu überprüfen.

10.1 Gewitterformationen Berlin

Am **17.8.00**, vormittags zogen im Raum Berlin (Abb. 8) unterschiedliche Zellen von West nach Ost (Lang, 2001), manche sehr geradlinig, andere mit Schwenks und meist südlich entstandenen Tochterzellen oder kurzen Primärzellenphasen. Manche Zugbahnen werden innerhalb 9 Stunden mehrfach überdeckt. Berlin selbst wird von Primärzellen nur in den Außenbezirken berührt. Bemerkenswert ist, dass nicht alle Zellen parallel ziehen. Diese Situation verdeutlicht das komplexe meteorologische Geschehen, aus dem sich die Gewitterzugbahnen herauskristallisieren und Dynamik und Einflüsse erkennen lassen.

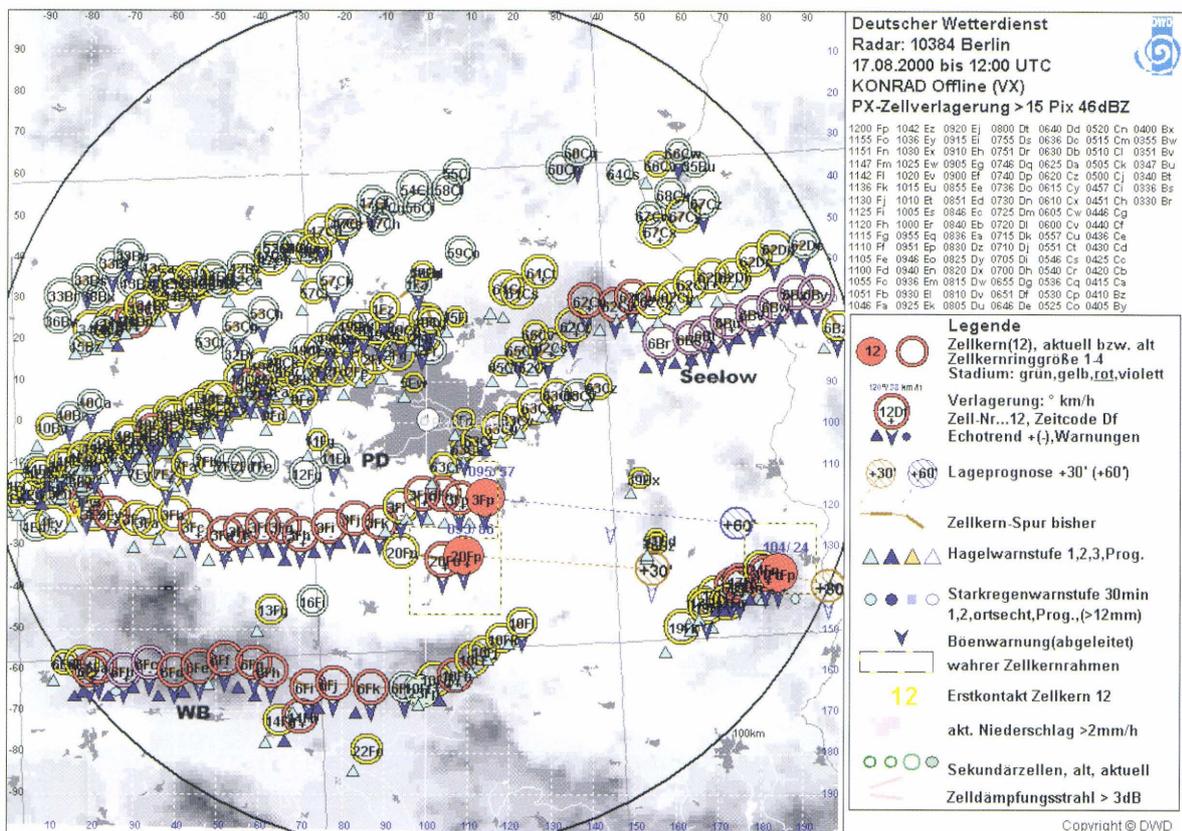


Abb. 8: KONRAD-Offline-Zugbahnen (ohne Ergänzungsinformationen) von Zellen am 17.8.00 im Raum Berlin zwischen 03:30 und 12:00 UTC, Ausgabezeit 12:00. Hier sind nur Primärzellen mit Zellnummer und 2 Buchstaben-Code des Zeitschritts (re. ob.) abgebildet.

Neben den Zuggeschwindigkeiten einer Zelle entlang ihrer Bahn variieren auch die Kernflächen bzw. Zellstadien (Farbringe). Dichte Zellüberdeckung, d.h. langsame Verlagerung (Abb.8, rechts unten) wechselt mit überwiegend zügiger Verlagerung wobei Windwarnungen angezeigt werden.

In Seelow (Abb.8: Seelow) wird von "großen Hagelkörnern", "Sturmböen" und Gebäude- und Autoschäden berichtet, die von der als extrem eingestuften Zelle 6 (violett, 6Bt=03:40 UTC) stammen. Auch in Wittenberg (Abb.8: WB) wird ein "Unwetterchaos" mit "Sturm- und Hagelschäden" von einer weiteren Zelle 6 (6Fe=11:05 UTC) gut dokumentiert.

Andererseits sind die vielen weiteren ausgeprägten Zellentwicklungen in Internet-Medien (www.paperball.de) mangels Meldungen nicht nachprüfbar.

Am **19.8.00** zogen zwei Superzellen über Berlin hinweg, mit Hagel, Böen aber kaum Starkregen, nur in Tiergarten fielen 26 mm (Abb. 9). "Die Feuerwehren rückten zwischen 18:45 und 22 MEZ mit 900 Einsatzkräften zu 180 Einsätzen aus" unter Ausrufung des Ausnahmezustandes. Beim Deutsch-Amerikanischen Volksfest musste das Rote Kreuz mehrere leichte Verletzungen durch Hagel behandeln. In Potsdam war es "extrem windig"

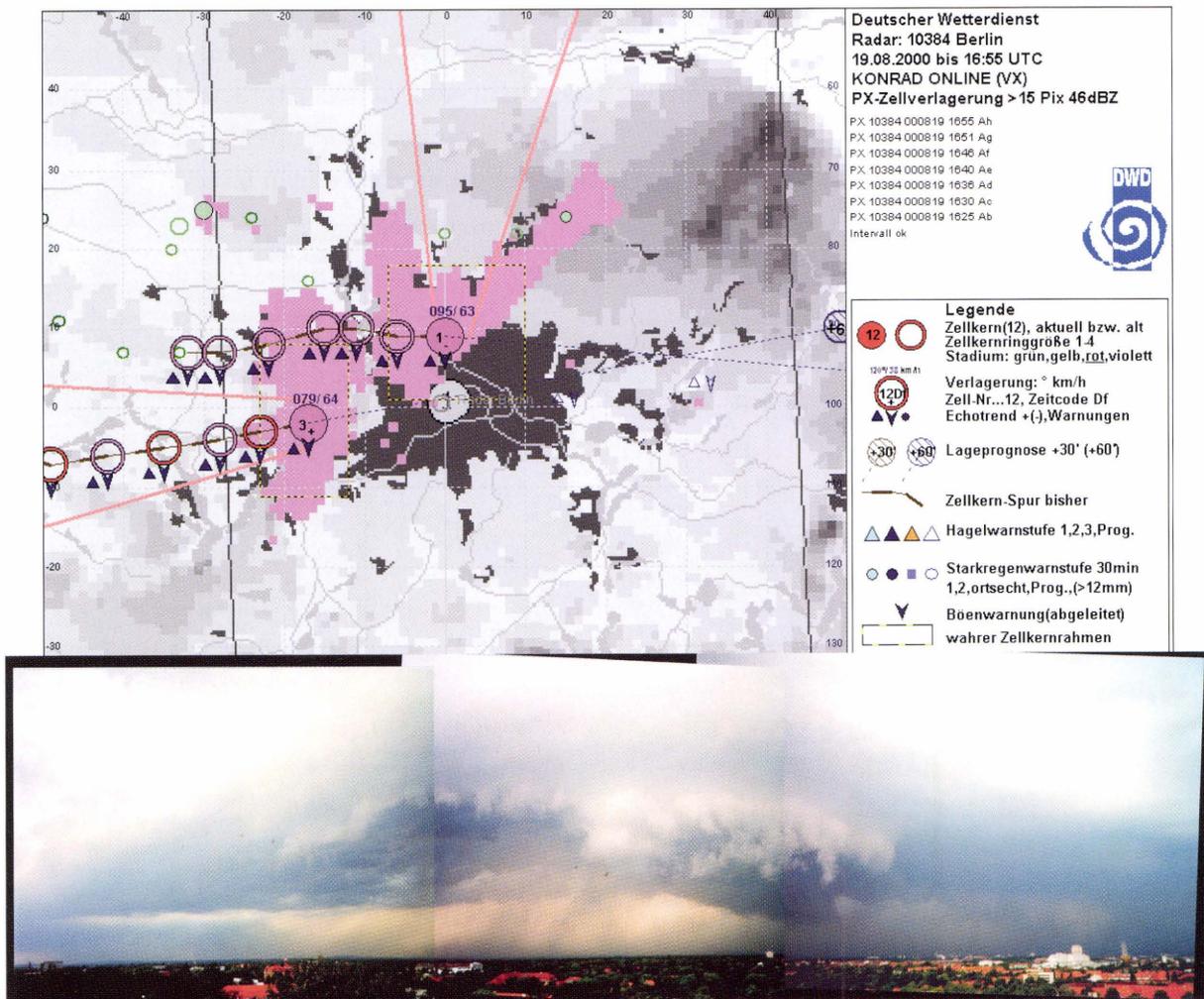


Abb. 9, oben : Die nördliche und südliche Superzelle in KONRAD VX Online am 19.8.00, 18:55 MEZ im Bereich Berlin (gezoomt). Dominierende Hagel- und Böenwarnungen zweier Zellen in ihrem maximalen Stadium (violett). Zellhistorie 30 min bei einer Lebenszeit von >60 min und geradliniger Verlagerung. "Dämpfungsspeichen" dieser Zellen sind nach Westen und Norden (dort auch im akt. Niederschlagsfeld >2mm/h, violette Fläche, als "Speiche" zum Radar (1) hin), zu erkennen.

Abb. 9, unten : Dreiteiliges Photo der Superzelle von "Berlin Storm Chasers" (www.GermanSevereWeather.de)

mit Baumschäden. Am Wannsee wurden Hagelbeschädigungen an Autos verzeichnet, die Avus war wegen umgestürzter Bäume gesperrt.

Die als Superzellen (Zellstadium: violett) eingestuftes Gewitter waren als isolierte, gestaffelte Einzelzellen, auf geradlinigem Weg (ohne Multizellbildung), schon mindestens 1h vorher in KONRAD zu erkennen. Sie verursachten als Zellen im Radarvordergrund Dämpfungsschatten, markiert durch zwei rote radiale Linien und verschmolzen am Ostrand Berlins. Generell kann eine Großstadt durch Bodenechoeffekte bei nichtoptimierten Filtermethoden oder durch Abschattungsspeichen Zellkernflächen verstümmeln und größere Kerne zweigeteilt erscheinen lassen, bei jeweils reduziertem Stadium und Hagelstatus. Auch der Zug einer Zelle direkt über das Wetterradar kann manchmal diskontinuierlich analysiert werden, wobei auch Ortungsprobleme im Nahbereich eine Rolle spielen können.

Ausscherende Zugbahnen z.B. nach einer Zellspaltung ("Splitting") deuten auf zellinterne Rotationen und ggf. ausgeprägtere Begleiterscheinungen hin, sind aber mit dieser abweichenden Bahnrichtung nicht automatisch hervorzuheben (Abb. 8, linker Bildrand), da die "Normal"-Strömung ihrerseits nicht leicht identifizierbar ist.

Die Situation vom 19.8.00 wurde als Beilage zur Berliner Wetterkarte veröffentlicht (Dahl et al., 2000)



Abb. 10: Die Zugbahnen der Primärzellen 1 und 3 am 19.08.00 15:40-17:40 UTC, Berlin. Die südliche Zelle 3 geht am östlichen Stadtrand in die Zelle 1 auf (Schwenk nach Süden). Zugbahn Zelle 5 (unten links) hat für 5min einen "Aussetzer" ihres Primärzellenstatus (vorübergehender Sekundärzellenstatus infolge radarnaher Dämpfungseffekt durch Zelle 3). Dies bewirkt den Verlust der Hagel- und der Böenwarnung und sie wird danach zur Zelle 8 (Zeitcode Hx->Hz, unten, links). Legende siehe Abschn. 9.1.

10.2 Frühjahrs-Starkregenfälle

Die pixelweise Starkregenwarnung basiert in KONRAD meist auf kontinuierlicher Pixelüberlappung in aufeinanderfolgenden Radarumläufen, seltener auf Kurzzeitintervallen extremen Starkregens z.B. $>40\text{mm/h}$.

In Abb. 11 ist ersichtlich, dass konvektive Starkregenfälle auch verbreitet fallen können und dass das schematisierte zellbezogene Warnsymbol von geringerer Qualität gegenüber dem Pixelfeld mit Starkregenspotential ist (fehlend bei Zelle 13). Auch sind die Zugbahnen durch interne Zellumschichtungen mit Schwerpunktverlagerungen verwinkelt. Die Zellkernbereiche überlappen sich stark bei Zuggeschwindigkeiten von 20-25 km/h. Vermutlich bewirkten u.a. bodennahe Windscherungen eine Regeneration an den Flanken.

Im Bereich Ahlen, nördlich von Hamm wurden am 3.5. Überschwemmungen an der Werse, mit Massenevakuierungen und THW- Einsätzen verzeichnet. Die beiden anderen Starkregengebiete der Zellen 7 und 10 sind weniger dramatisch verlaufen (Soest meldet nur wenige Feuerwehreinsätze aber die Verifikation des Hagels).

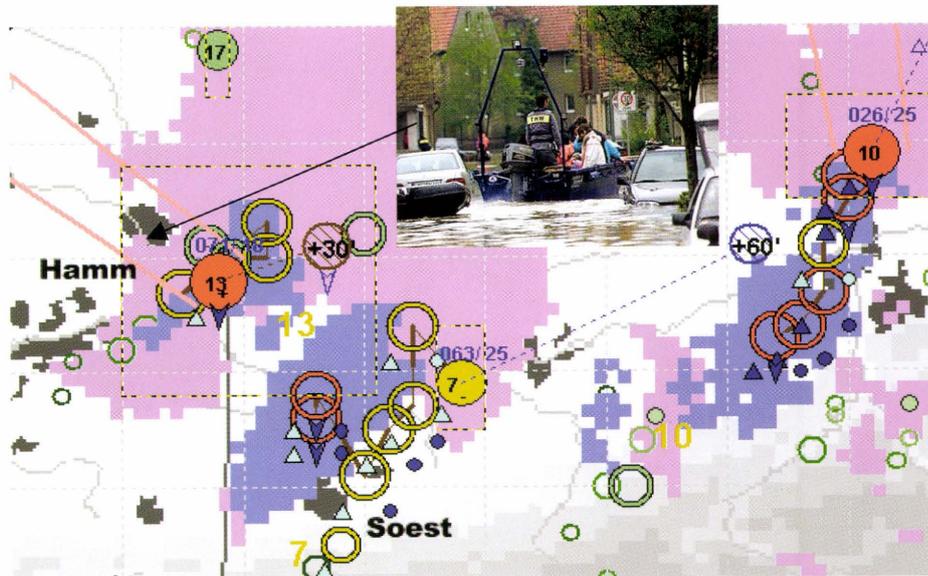


Abb.11: Blaue Starkregengebiete vom Radar Flechtdorf (KONRAD PX Online) vom 3.5.01, 15:05-15:36 UTC im Raum Soest an den Zellen 7, 10, 13 mit bereits erreichten Lebensdauern von 90, 80 und 40 min und den relativ kurzen Zugbahnen zwischen der Erstkontakt- und der aktuellen Position (Rasterfeld $\sim 10\text{km}$). Nach 83 mm Hochwasser der Werse in Ahlen (Insert). Legende siehe Abschn. 9.1.

Die folgende Abbildung 12 ist ein Beispiel für Starkregen, der auch entlang schleichender Frontalzonen mit eingelagerten Zellen auftreten kann. Zeitweise sind die Windwarnungen hier, auf der Basis von Linienstrukturen >20 km zweifelhaft, wenngleich starke Echogradienten gefunden wurden, die vorderseitig einen starken updraft anzeigen könnten (Dowell III, 1985). Im Bereich Krailling (südlich Zelle 17) wurden an diesem Nachmittag Starkniederschläge von >25 mm/30min gemessen (Ombrometer HP, Krailling).

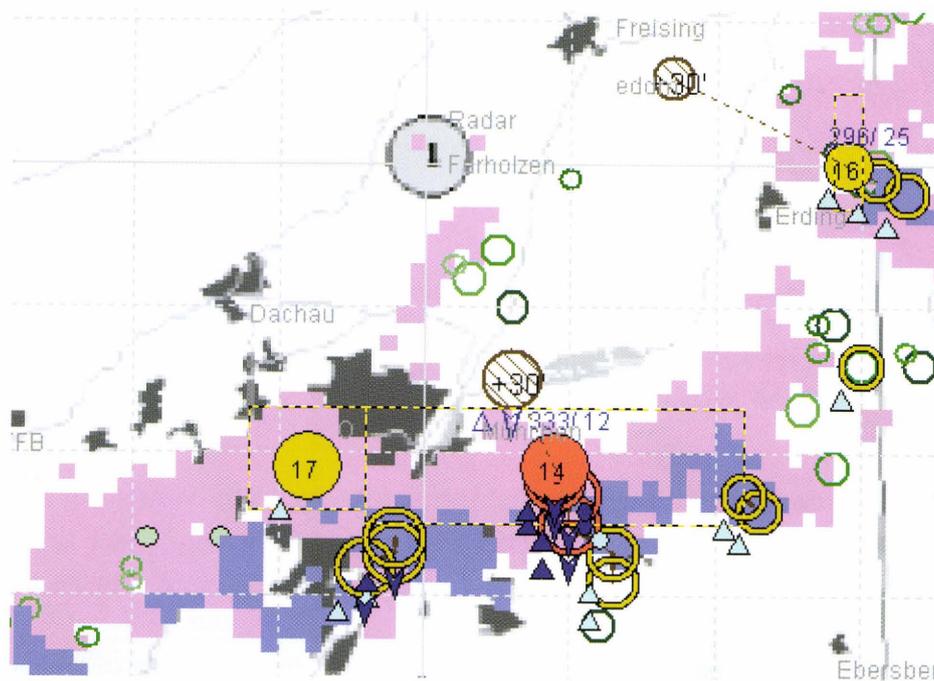


Abb.12: Starkregen aus KONRAD PX Online im Bereich München vom 5.5.01, 14:20-14:52 UTC, Bildausschnitt. Bemerkenswert sind die Zugbahnen nach NW mit 12-25 km/h. Legende siehe Abschn. 9.1.

10.3 Schnellziehende Zellen mit Böen

Die verlässlichsten Böenwarnungen waren an schnellziehenden Zellen ($> \text{Bft. } 8$) zu verzeichnen. Auch einige Beobachtungen tornadoähnlicher Effekte waren damit verknüpft. Die Zellverlagerung in 5-10 min Zeitschritten kann trotz Schwerpunktwechsel im Kern kontinuierliche Böenwarnungen erzeugen, die oftmals mit realen Bodenböenfronten einhergehen. Am 23.3.01 wurden am Südrand Münchens frühe schnellziehende Gewitterzellen (85 km/h) mit Hagel und Downbursts analysiert, die von einer Beobachtung bestätigt wurden. **Die Baumschäden im Forstenrieder Park** waren ausgeprägt mit auffälligen Schadensnestern (Abb. 13). Sie wurden in der TORDACH Datenbank (www.tordach.org) als Tornado/Downburst geführt.

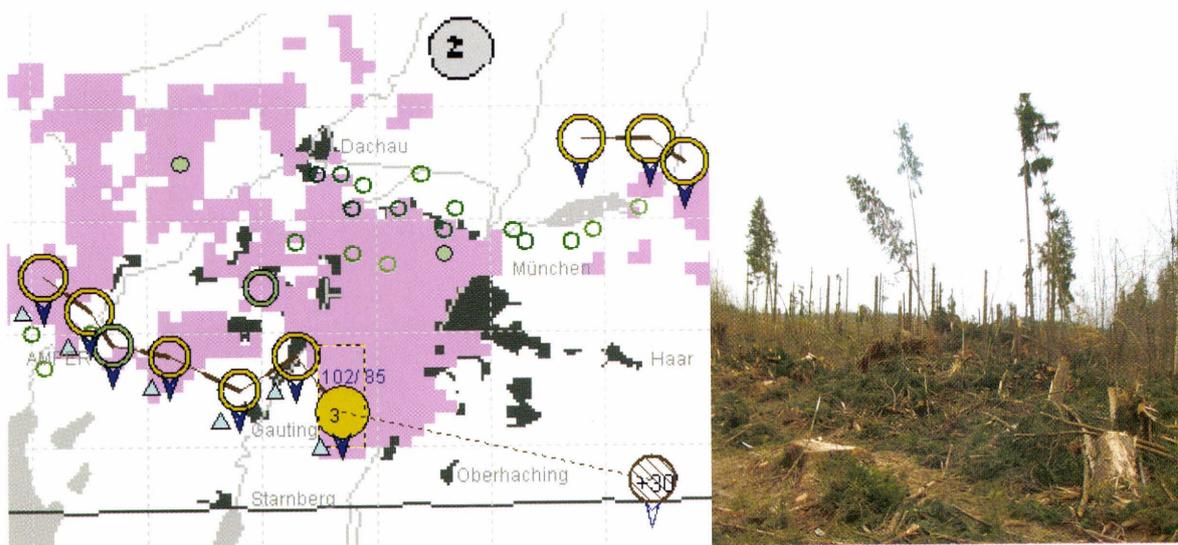


Abb. 13: 20min-Zugbahn der Zelle 3 am 23.3.01, 15:03-15:21 UTC, mittels KONRAD PX Online des Radars Met. Obs. Hohenpeißenberg in 3min (!) Zeitschritten bei >85 km/h Zuggeschwindigkeit. Tornadobeobachtung und Baumschäden (Forstenrieder Park, rechts) am vorletzten Zellkreis. Legende siehe Abschn. 9.1.

Bei dem **Tornado in Windhagen** (Abb. 14) machte die Zelle vorher bei der Rheinüberquerung zur Autobahn E35 einen beschleunigenden "Sprung", der in der jetzigen KONRAD-Version eine Böenwarnung mit >69 km/h erzeugt hätte, damals noch nicht so weit verfeinert war.

Windböen oberhalb einer Bft.8-Warnschwelle sind kaum weiter abstufbar, ebenso wenig ist z.Z. ein Schluss auf extreme Downbursts oder gar Tornados möglich.

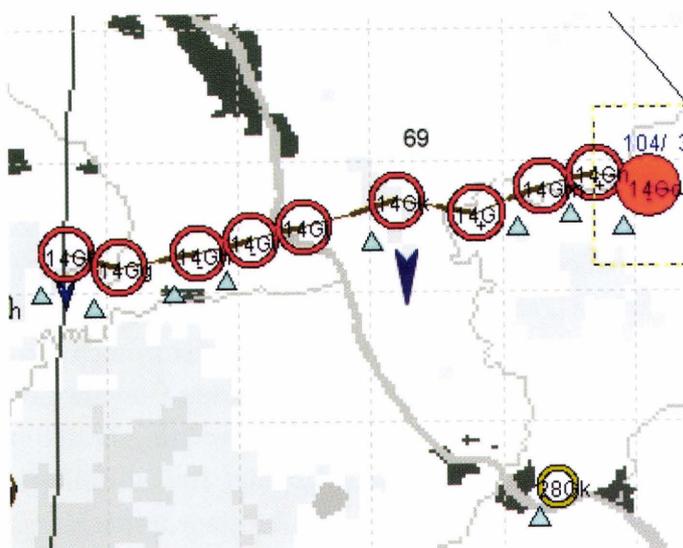


Abb. 14: Zugbahn einer Zelle im KONRAD PX Online vom 1.7.2000, 13:20-14:05 UTC im Bereich Windhagen (Bildmitte, östlich des Rheins, oben Königswinter), gesehen vom Radar Neuheilenbach. Eingesetzt ist ein Böenwarnsymbol und die Zuggeschwindigkeit 69 km/h, die in der KONRAD-Version 7/2000 noch nicht wie heute umgesetzt war. Die "rote" Zelle 14 (Gk, am Zelling li. ob. liegt Windhagen) war Ursache für den etwa 10min später beobachteten Tornado.

Legende siehe Abschn. 9.1.

In Strasbourg wurden am 6.7.01 11 Konzertbesucher von einem umstürzenden Baum bei Windböen bis 150 km/h erschlagen. Eine halbe Stunde vor dem Ereignis wies eine sich nähernde **Squall-line** noch mehrere konvektiv-aktive Primärzellen auf, die alle hohe Zuggeschwindigkeiten zwischen 71-93 km/h hatten. Das folgende nächtliche Zusammenbrechen des starkkonvektiven Niederschlagsprozesses erbrachte in KONRAD einen Übergang zu ungetrackten Sekundärzellen ohne Warnumfeld.

In Abb.15 soll das violette Feld des Niederschlags in der Umgebung markierter Zellen dem Nutzer signalisieren, dass die gesamte Squall-line, auch in den Bereichen zwischen den Zellkernen, böengefährdet ist. Freiburg hatte an dem Tag trotz Warnung keine vergleichbar starke Schäden wie Strasbourg.

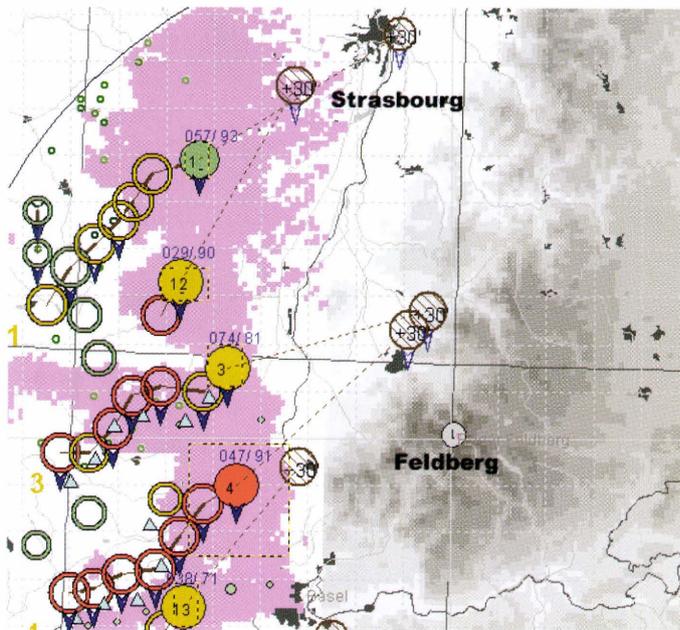


Abb. 15: Die Squall-line vom 6.7.01, 21:30 MESZ, gesehen vom Feldberg-Radar. Die Zelle 1 wird zum letzten Mal als Primärzelle erkannt und zieht mit 93 km/h auf Strasbourg zu. Dort traten Windböen mit Personenschäden auf. Für Freiburg (Bildmitte) gilt allerdings eine ähnliche Vorwarnung. Legende siehe Absch. 9.1.

Am 7.7.01 (Abb.: 16) gab es auf den oberbayerischen Seen bei Windstärke 10 einige Regattaunfälle mit zwei Toten. Die Zellverlagerungen lagen unter 63 km/h, trotzdem lief der Gewitterlinie östlicher eine **Böenfront** um 20 km voraus (bis 122 km/h in München, Abbruch von Freiluftveranstaltungen um 12:45 UTC). Diese konnte mit KONRAD nicht mehr erkannt werden, wengleich die zurückliegende Zelle 1 als große Hagelzelle Windwarnungen erzeugte. Die richtig erkannte Hagelzugbahn (Stufe 2) hinterließ hohe Pflanzenschäden an Mais mit Entschädigungsforderungen der Landwirte. Dies ist ein Beispiel für die Notwendigkeit von ergänzenden Böenwarnungen bzw. Verbesserungen beim Warnalgorithmus.

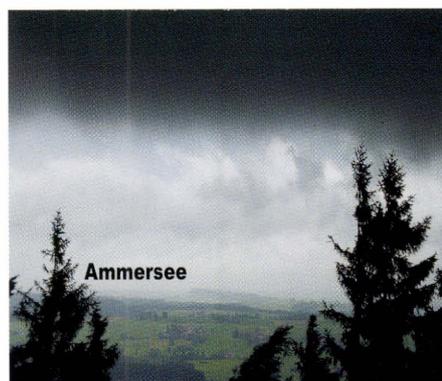
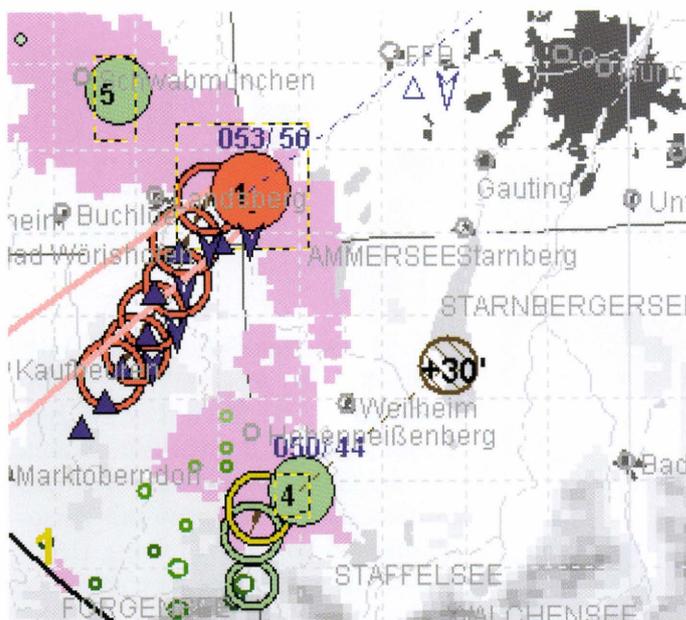


Abb. 16, links: Vorbeizug der Zelle 1 am Ammersee-NW-Ufer am 7.7.01, 12:00, gesehen vom Radar München. Böen- und Hagelwarnungen seit 20 min, Zugrichtung einer Böenfront nach ENE. Legende siehe Abschn. 9.1. Rechts: Photo vom MOHp aus.

10.4 Zellen mit ausgeprägtem Hagel

Am 14.7.01 zog eine einzelne **Hagelzelle** auf den Hohenpeißenberg zu (Abb. 17).

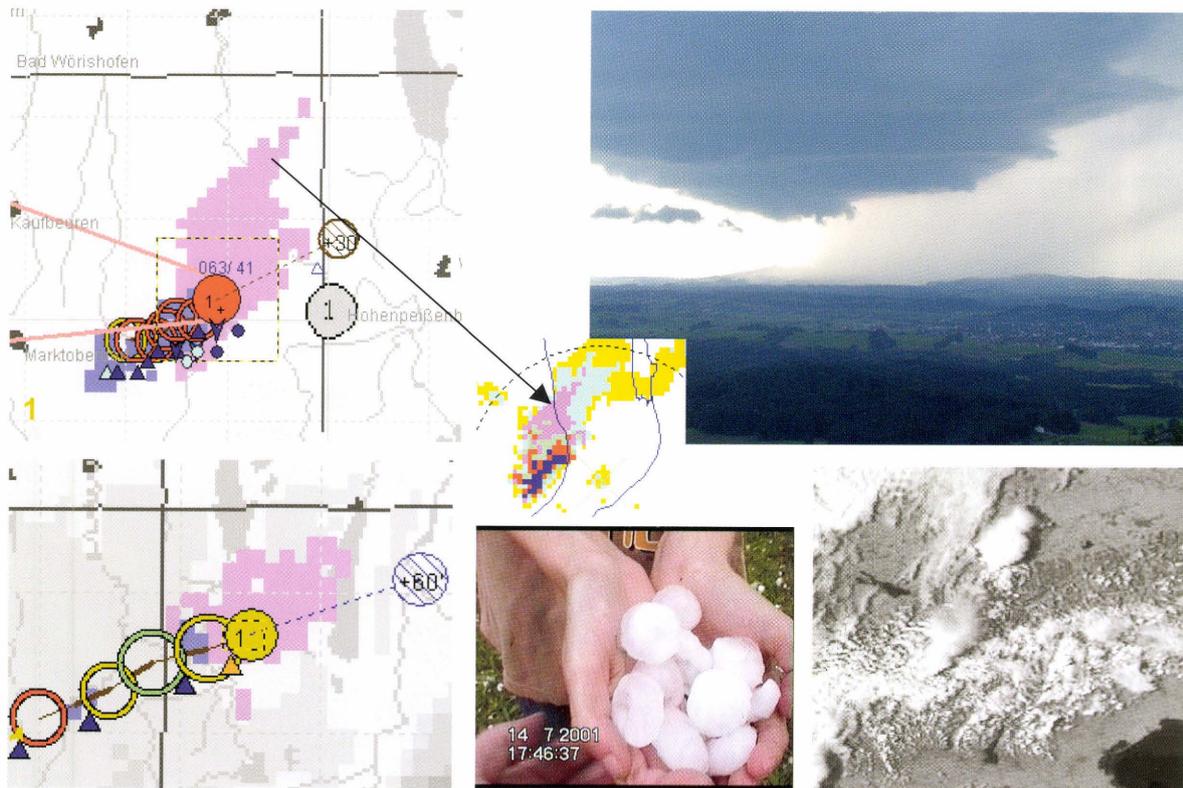


Abb. 17: Die isolierte Hagelzelle vom 14.7.01 im Raum Hohenpeißenberg, KONRAD PX Online von 15:57 UTC (20 min Zellhistorie, Radar Hohenpeißenberg), li. ob. und KONRAD PZ Online von 16:42 UTC (1h Zellhistorie, 15min Zeitschritte, Radar Türkheim), mit Hagelwarnung Stufe 3 darunter. In der Mitte ist der PX-Bildausschnitt von 15:57 UTC mit einer Y-Kernstruktur (Zentrum), kennzeichnend für ausgeprägte Zellen, eingeblendet. Das NOAA 14 VIS Satellitenbild um 16:03 UTC mit der Zelle im Norden, zwischen Boden- und Chiemsee, sowie ein Bild der rotierenden Wolkenformation ("Collar cloud"?) und der Hagelkörner bis 4 cm Durchmesser ergänzen die Dokumentation. Legende siehe Abschn. 9.1.

Trotz Fehlen einer klaren mesozyklonalen Struktur im Dopplerprodukt schienen Windscherungen mit einer Up- bzw. Downdraft Überschneidung zum Hagelprozess wesentlich beizutragen. Starkregen und Böen waren sekundäre Erscheinungen, die Hageldurchmesser erreichten 4 cm (Hagelstufe 2 im KONRAD PX Online). Die Zelle selbst wirkte echo-dämpfend für etwaige Zellen im Hintergrund. Ihr sichtbarer Wolkenschirm überstieg die Länge des Bodensees (NOAA 14 Bildausschnitt). Die versuchsweise eingeführte Erkennung von großem Hagel (Hagelstufe 3, nur im PZ) sprach nur für Radar Türkheim und allerdings auch zu spät an. Sie stützt sich auf die Erkennung von Starkechozone oberhalb 6 km. Die Hagelwarnung basiert dann auf der These, dass sich diese Hagelbildung in starken Aufwindfeldern bis deutlich oberhalb der Nullgradgrenze erstreckt und dort eine abgesetzte Akkumulationszone zirkuliert, mit einem zeitweisen Echogradienten nach unten.

Am Fall der in Abb. 18 dargestellten Situation wurde die Chance untersucht Anzeichen in Echostrukturen und deren Ablauf zu nachweislich schadenverursachenden großen Hagelkörnern zu finden. Aber die vermutlich vorhandenen hohen Vertikalgeschwindigkeiten

sind auch im Dopplerprodukt schwierig zu identifizieren. Da schon wenige große Hagelkörner >2 cm in mehrfachen Wachstumsprozessen Wasserschichten anlagern, die dann eine extreme Reflektivität im Grenzbereich der Rayleigh- zur Miestreuung verursachen (>60 dBZ). Als Überlegung für die Hagelstufe 3 liegt zugrunde, dass bei Fallgeschwindigkeiten von z.B. 20 m/s und Zirkulationshöhen von z.B. 3-5 km mehrere Minuten für einen Zyklus erforderlich sind. Wenn nun durch eine Berührungszone von starkem Aufwind und Absteigen das einzelne große Hagelkorn mehrere Zyklen durchläuft, könnte gleichzeitig eine geringe Reflektivität unterhalb 6 km (erzeugt auch durch eine relativ trockene "weak echo region" des starken Aufwindes bzw. den normalen hagelfreien Regenprozess) diesen laufenden Prozess abgrenzen. Sollte nun ein 15 min Messzyklus, solch einen Gradienten oder starken Überhang identifizieren, wird eine Hagelwarnung 3 (gelb) aktiviert. Dass damit nicht alle Ereignisse mit großem Hagel erfasst werden, ist anzunehmen. Im Beispiel 17.8.00 (Abb. 18, links) tritt eine solche extreme Kernstruktur in der Höhe mehrfach auf, allerdings auch bei einer südlicheren Zelle. Mögliche gravierende Fehlwarnungen sind, wie hier, weder auszuschließen noch verifizierbar.

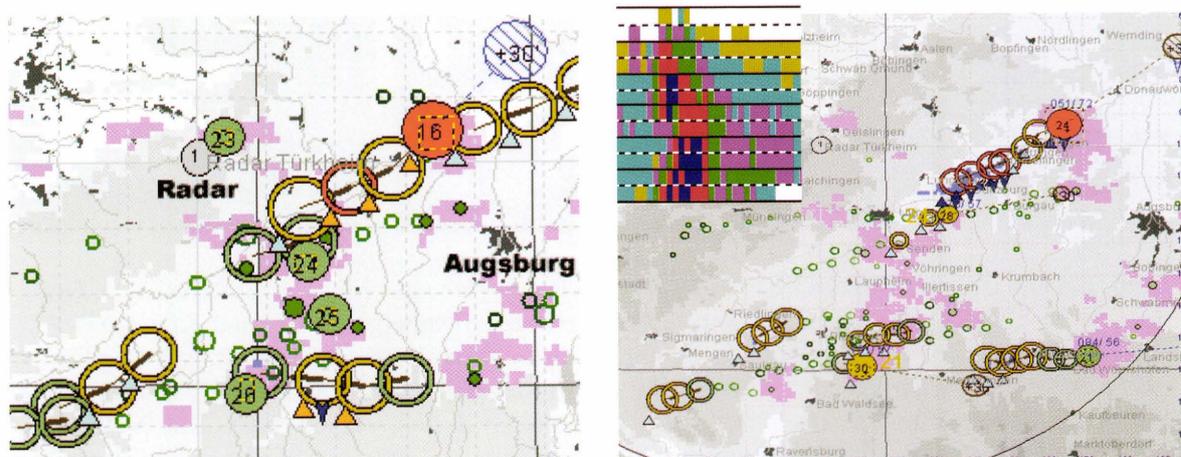


Abb. 18: Gegenüberstellung von KONRAD PZ und KONRAD PX Online, 17.8.00, 15:36 bzw. 15:43 UTC. Inset: Vertikalstruktur von Zelle16 mit mögl. Hagelreservoir (blau, 7km) um 15:43 UTC, Radar Türkheim. **Links** 15min Zeitschritte und 60 min Zellhistorie (Hagelstufe 3), **rechts** 5min Zeitschritte bei 30min Zellhistorie nur mit Hagelstufe 1-2. Millionenschäden westlich Donauwörth (Zelle16 bzw. 24) durch großen Hagel. Zelle 16 läuft abweichend entlang der Donau auf einer vorangegangenen Zellzugbahn.

Aus Abb. 18 geht außerdem hervor, dass die 5 min Starkregenwarnung nicht vergleichbar in der 15 min Bildfolge auftritt. Dies belegt, dass der 15-Minuten Zeitschritt zu groß für die Darstellung schneller konvektiver Entwicklungen ist. Dasselbe gilt auch für die Böenwarnungen, die an diesem Termin durch Beobachtungen gestützt werden. Auch ist die Hagel 3-Warnung nur mit einer Hagel1-Warnung in PX gekoppelt (südlich alte Zelle).

In Abb. 19 wird deutlich, dass es Beispiele für Gewitter mit häufigen städtischen Feuerwehreinsätzen gibt, die in KONRAD keinen besonderen Warnhintergrund haben. Auch gibt es Beispiele, wo die Warnung "großer Hagel" offenbar ungerechtfertigt als Fehlwarnung erscheint.

Die Zugbahnen in Abb. 19 sind auf der Basis des Münchener Radars, wie jener des Hohenpeißenberger Radars im Stadtgebiet etwas nach Norden bzw. nach Süden verschoben. Die Ursache ist unklar, wobei bei dem mäßigen Zellstadium kaum Dämpfungseffekte mit jeweils zu schwach dargestellten Zellrückseiten und Mittelpunktverschiebungen in Frage kommen.

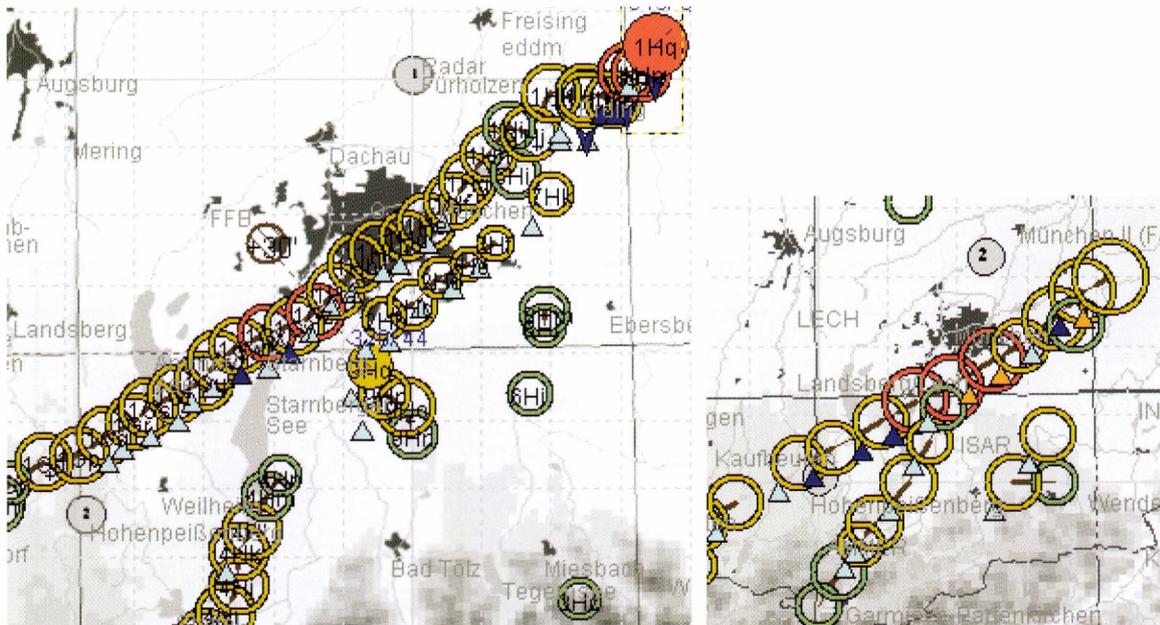


Abb. 19: Zellzugbahn über München vom 15.7.01, 14:00-16:30 UTC, links KONRAD PX Offline, Radar München und rechts KONRAD PZ Offline, Radar Hohenpeißenberg (ohne Zeitcode 12-17 UTC).

200 Feuerwehreinsätze u.a. wegen Überschwemmungen und einiger Sturmschäden. Hagel-schäden waren kein Thema. Fehlende Starkregenwarnungen, Zuggeschwindigkeiten der Zellen <55 km/h. Auch vom Radar Hohenpeißenberg gab es kaum Starkregen- und Böenwarnungen. Rechts, zwei Hagel3-Warnungen am SE-Rand Münchens ohne Medienbestätigung.

Extremaussagen wie in Abb. 20 sind im ländlichen Gebiet durch eine Vielzahl von Einsatzmeldungen durchaus verifizierbar, sie müssten aus rein meteorologischer Sicht auch als Extremwarnungen auf Extrembedingungen zurückgehen. Jedoch "verlieren" sich möglicherweise einige Auswirkungen im unbesiedelten Raum und damit auch ein Teil der Warnbedeutung.

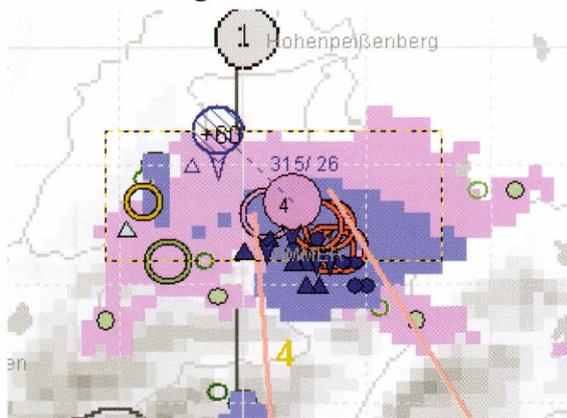


Abb. 20 : KONRAD PX Online Darstellung der Extrementwicklung vom 27.6.01, 15:21-15:39 UTC im Nahbereich von Radar Hohenpeißenberg. Starkregen und anhaltender Hagel führten zu Feuerwehreinsätzen im ländlichen Raum und kleineren Orten.

Bei der kleinräumigen Hagelidentifizierung könnte infolge der zunehmenden Strahlbreite die Hagelerkennung im Fernbereich manchmal fehlschlagen.

Unwetter im ländlichen Gebiet werden durch die Medien nach allgemeiner Erfahrung auch meist lückenhafter dargestellt als im großstädtischen Bereich.

Verläuft eine Zugbahn hinter Höhenzügen, so sind Warnungen infolge teilweiser oder vollständiger Beeinträchtigung der Radarortung möglicherweise unsicher oder unvollständig. Abb. 21 zeigt Hagelstraßen am nördlichen Inntal ohne Meldungen in den Medien, jedoch mit Schäden an Kulturpflanzungen außerhalb der registrierten Zugbahnen. Auch vor möglichem großen Hagel wurde woanders gewarnt. Die fehlerhafte Bestimmung der bodennahen Aktivitätsschwerpunkte mag an der eingeschränkten bzw. fehlenden Sicht der Gewitterbasis liegen (PX).

Den Schäden im Raum Innsbruck vorangegangen sind beispielhafte NNE-Zellverlagerungen paralleler Zellen, ausgelöst in den Bergen zwischen Innsbruck und Bodensee (Abb. 21, links unten.)

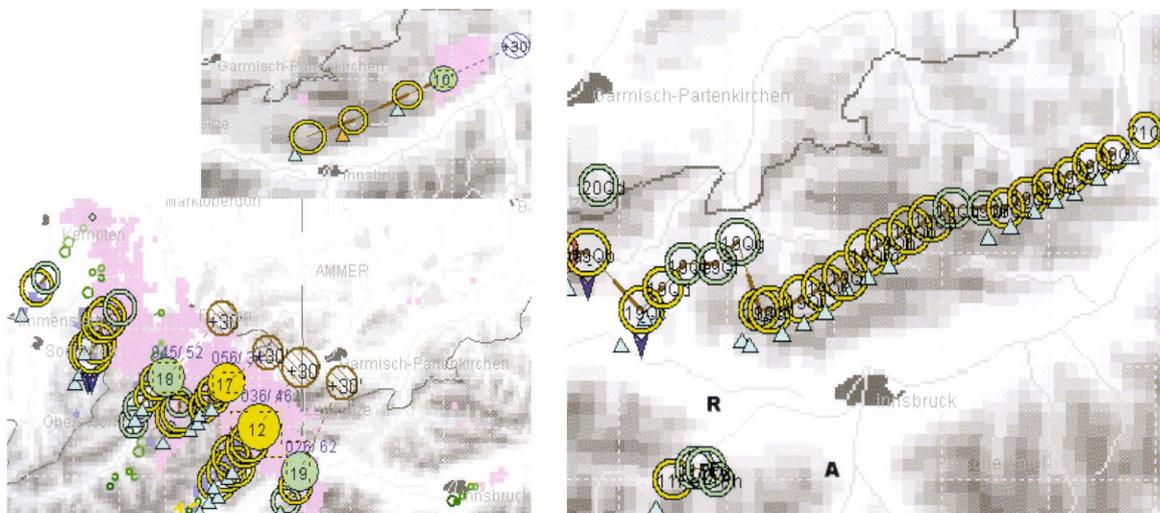


Abb. 21: Hagelzüge im Inntal am 2.8.01, 19:30-22:30 UTC vom Radar Hohenpeißenberg aus. Links unten -PX Online 20:42 UTC, links oben KONRAD-PZ Online 22:11 UTC, und rechts -PX Offline, 19:30-22:30 UTC. Zugbahnen der nächtlichen Zellen westlich Innsbrucks ohne Medienresonanz, Pflanzenschäden außerhalb der inntalparallelen Hagelzugbahn (R, A), Hagel bis $d = 3,5$ cm

Die dramatische Zellaktivität am 03.08.2001 war gekennzeichnet durch eine rechtsdrehende Zellzugbahn zwischen Miesbach (MB) und Rosenheim (Ro, Zelle 24 bzw. 16 in Abb. 21). In diesem Abschnitt schien sie die höchsten Schadensauswirkungen dieses 3.8. zu entwickeln, die von der Münchner Rückversicherung auf über hundert Millionen Mark bei lokal >5000 Schadensmeldungen geschätzt wurden. Dazu zählten Hagelschäden (Körner mit "5-Mark-Größe") an Personen, Natur- und Kulturpflanzen und Autos. Die Autobahn München Salzburg war am Irschenberg (IB) blockiert. In Abb. 22, unten, ist der Hagelzug als Zellkernschwerpunkt genauer nachgezeichnet. Hagelstufe 2 aus der Zellbasisanalyse kam nur am Irschenberg selbst vor, die noch experimentelle Hagelstufe 3 wurde mehrmals als Vorwarnung vor Miesbach erreicht. Dazu hatte sich eine im Radar erkennbare Böenfront ausgebildet, die Schneisen der Verwüstung hinterließ und vor allem bei Götting (ca. 7

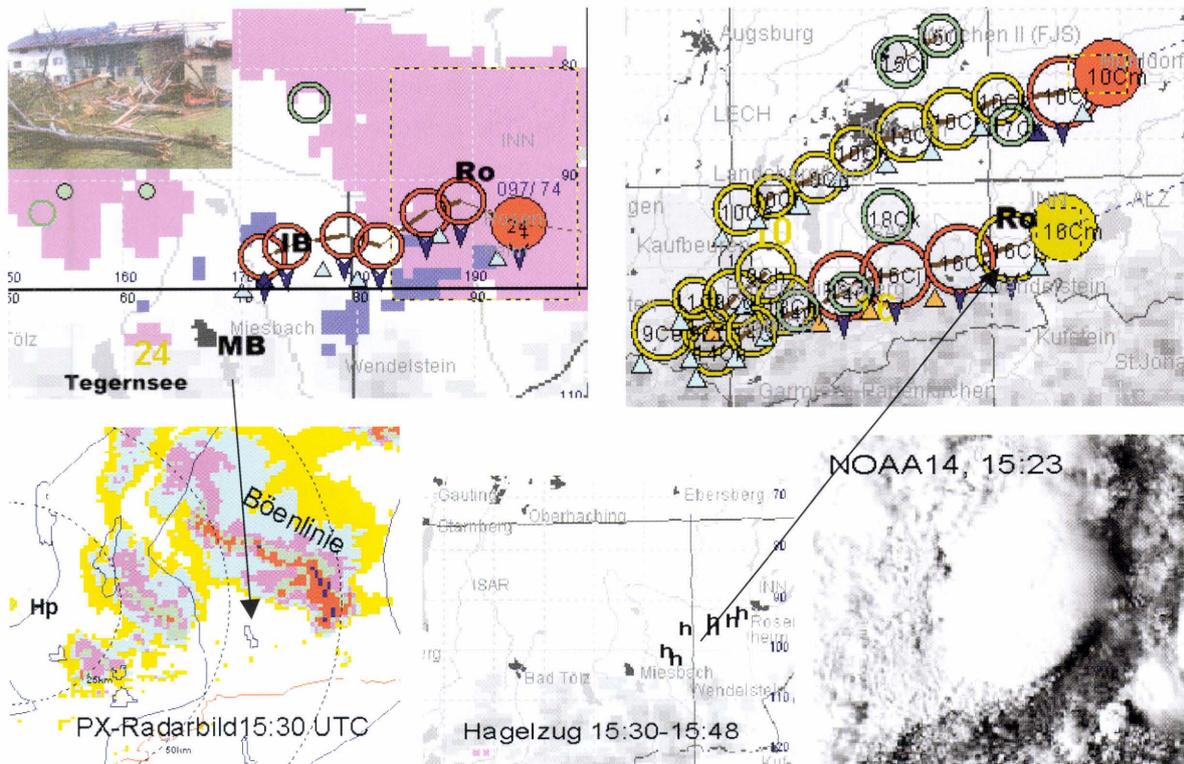


Abb. 22: Zellverlagerungen am 3.8.01 vom Radar Hohenpeißenberg aus, mit Hagel- und Böenschäden. Links oben 20 min Abschnitt PX 15:45 (Ro=Rosenheim), rechts oben 2h-Zugbahnen PZ mit Hagelstufe 3 bis 15:56, Insert oben Bauernhof in Götting, , unten Radarbild, Hagelzug und Satellitenbildausschnitt (NOAA14). Legende siehe Abschn. 9.1

km NE Irschenberg) auf Downbursts oder tornadoähnliche Maximalböen zurückzuführen ist. Die Zellgeschwindigkeiten lagen dabei bei >70 km/h. Etwas vor diesem Zeitpunkt um 15:23 UTC war im Doppler Radar des Hohenpeißbergs eine mesozyklonale Struktur in 3 km Höhe zu identifizieren (hier später auch eine der wenigen ungestörten Scherwindwarnungen aus der normalen Radarbilddarstellung RABID). Weitere 10 km östlich in Kolbermoor und Bad Aibling bei Rosenheim waren starke Hagelschäden an über 400 Autos zu verzeichnen, die von KONRAD PX (Analyse der Zellbasis) so gravierend nicht analysiert wurden (möglicherweise auch aufgrund der Entfernung von 80 km vom Radarstandort; Keulendurchmesser 1,4 km).

Interessant ist, dass die Hagelflieger von Rosenheim ab 15:05 UTC ohne Erfolg impften.

Am selben Tag (03.08.2001) wurde auch München von einer Zelle überquert, von der nur "erbsengroßer Hagel", "umgestürzte Bäume", "Wasserschäden", ein 10°C -Temperatursturz und nur 40 Feuerwehreinsätze gemeldet wurden. Starkregen wurde mit 8mm/10min gemessen (DWD), aber an Zelle 11 in KONRAD PX und im quantitativen Radarprodukt PH (max. 15-22mm/h) nicht angezeigt. Dies wurde auch von Nutzern angemerkt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Regenrate nur vom Radar 5-minütig als Mittel über je 1 km^2 erfasst wird.

Die Frage, ob die außergewöhnliche Aktivität und das Schadenspotential an den obengenannten Tagen gegenüber durchschnittlichen Primärzellverläufen an besonderen Merkmalen erkennbar ist, sollen die Zellaktivitätsabschnitte in Abb. 23 andeuten. Sicher gab es

auch in anderen Bereichen ähnliche Zellstadien und Warnsituationen wie im Raum Miesbach (außer Hagel3) ohne die breite Medienreaktion und Schadenssituation. Trotzdem verhindert KONRAD (bei guter Radarperformance) weitgehend ein Unterschätzen der Situation.

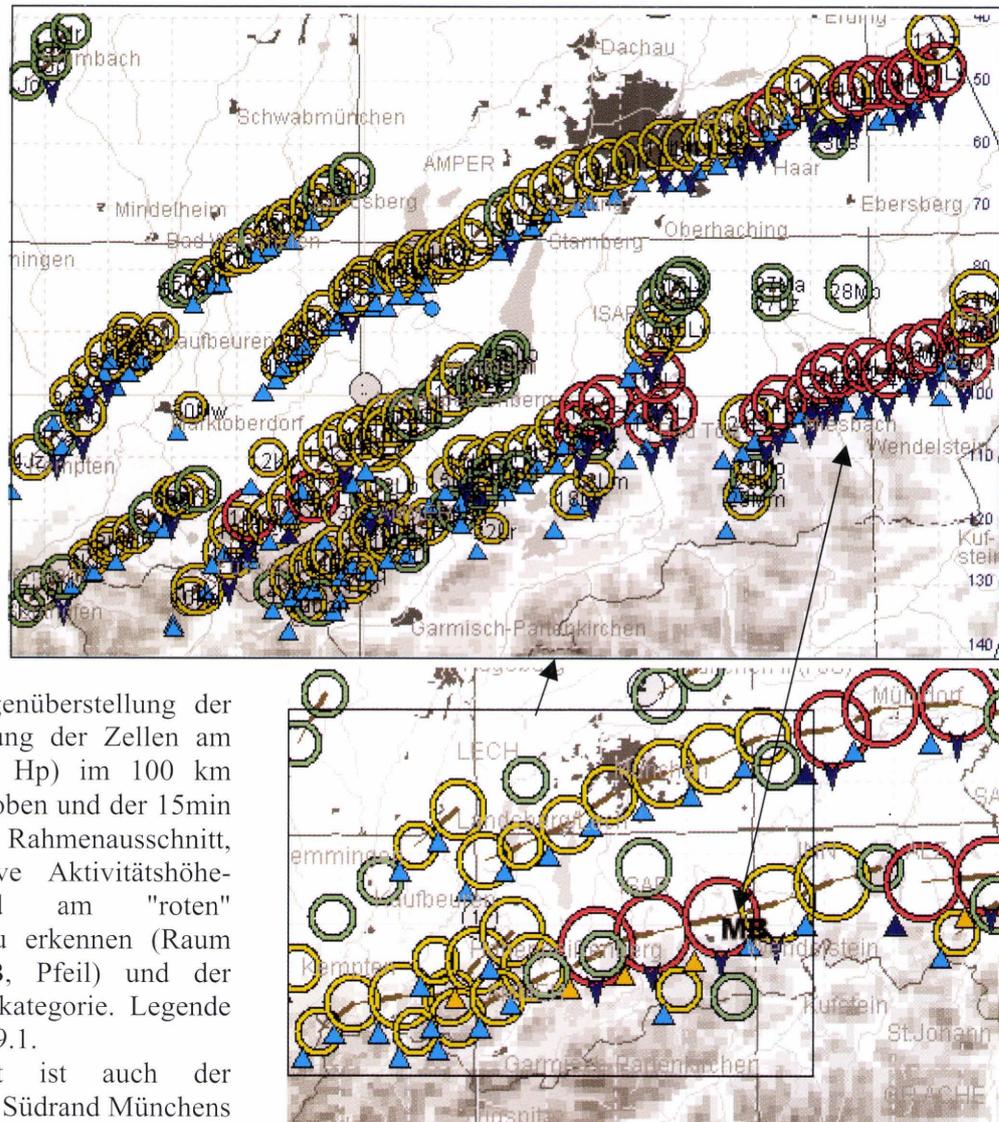


Abb. 23: Gegenüberstellung der 3min Verfolgung der Zellen am 3.8.01 (Radar Hp) im 100 km Radarumfeld, oben und der 15min Verfolgung im Rahmenausschnitt, rechts. Relative Aktivitätshöhepunkte sind am "roten" Zellstadium zu erkennen (Raum Miesbach MB, Pfeil) und der dortigen Warnkategorie. Legende siehe Abschn. 9.1.

Erwähnenswert ist auch der Zellverlauf am Südrand Münchens sowie ein erster Eindruck der Hagel 3-Häufigkeit. Die Zellvolumina erreichten am 3.8.01 nie ihr maximales Stadium "violett".

Katastrophensituationen sind auch in KONRAD noch nicht als solche erkennbar. Trotzdem war die lokale Vorhersage von Hagel und Böen aus einer beginnenden Zellkontinuität heraus gut möglich.

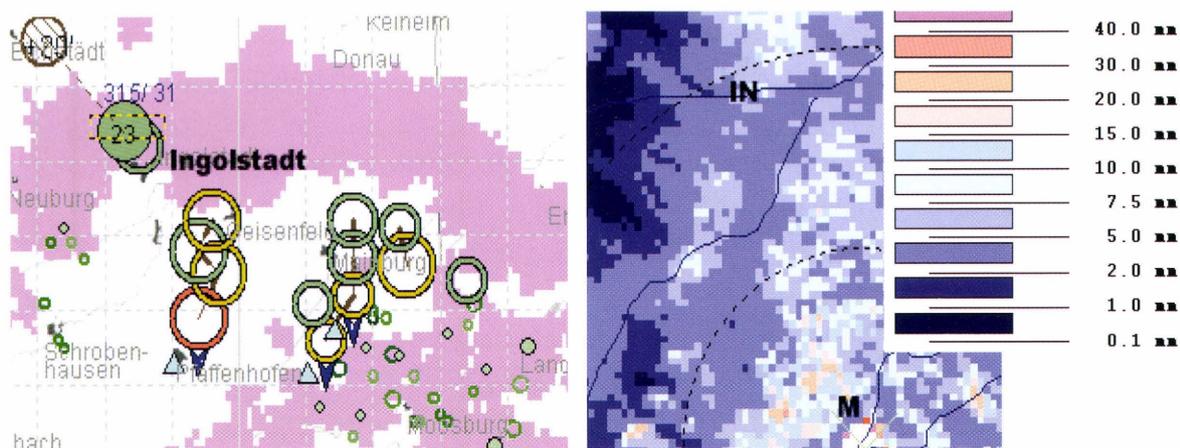


Abb. 24: Zellablauf vom 7.7.01, KONRAD PX Online 13:51 UTC (links) aus der Sicht der Feuerwehrleitstelle Ingolstadt. Die vorlaufende (-40min) unmarkierte Bøenfront wurde nicht erkannt (noch vor dem violetten Niederschlagsbogen); "starke Niederschläge" mit kleinem Hagel (<0,5 cm) wurden gemeldet, dazu Überflutungen und 100 Einsätze. Legende siehe Abb. 8.

Rechts ist die quantitative Radar-Regenakkumulation PH von 13:30-14:30 UTC in Farbklassen nördlich Münchens (M) als erste Starkregenverifikation dargestellt. Im Raum Ingolstadt (IN) werden nur bis max. 10 mm/(h) ermittelt. Siehe auch Abb. 16 vom gleichen Tag.

Nach bisheriger Erfahrung werden manche Zellen offenbar vom Radar unterschätzt. Der Nutzer erwartet aber eine seinem Empfinden gemäße Warnung. Der Starkregenbegriff ist beim Nutzer wirkungsbezogen, vermutlich sollte u.a. wegen des Aneichdefizits die Starkregenwarnschwelle etwas reduziert werden. Der Begriff starker Regen und Aquaplaning scheint beim Nutzer schon für Regenintensitäten ab ca. 8 mm/h zuzutreffen. Dies ist im ungünstigsten Fall bereits der Bereich, der im Zuge von Sekundärzellen und Schauerkerne (Abb. 24 rechts unten) markiert ist.

11. Verifikation der Ergebnisse, Reproduzierbarkeit, Statistiken

11.1 Verifikation der KONRAD[©]-Informationen

Die Art der Verifikation der KONRAD-Warnungen ist an einzelnen Beispielen des Kap. 9 bereits ersichtlich. Ein systematisches Verifikationsprogramm konnte bisher nicht durchgeführt werden.

In der Literatur sind Indexzahlen zu finden (z.B. CSI, critical success index), die zwischen überwiegendem Warnerfolg gegenüber Fehlwarnungen abwägen (z.B. *Polger et al., 1994, Hollemann et al. 2000*). Dies ist an Beobachtungsdaten stationärer Stationen mit langen Reihen möglich. Für eine flexible Verifikation mit möglichen Zugeständnissen an die subjektive wirkungsorientierte Einschätzung von Nutzerkreisen können die vielen Meldungen in Medien (Internet-Zeitungen) eine Basis bilden. Diese können Warnungen durch Augenzeugenberichte bestätigen, seltener aber widerlegen (fehlender Report des Warnmediums). Dafür sind sie aber im Raum höchst flexibel. Die nichtverifizierten Warnhinweise sind

evtl. nicht beobachtet worden oder medienseits sekundär, aber nicht notwendigerweise falsch und damit unkalkulierbare Fehlwarnungen.

Daraus ergibt sich eine gewisse Unsicherheit von KONRAD bei den nichtverifizierten Warn- und Zellhinweisen, die erst durch längerfristige systematische Verifikationsstudien eingeschätzt werden kann. Ein variables, durchaus den Erwartungen entsprechendes Vorkommen von Zellzyklen und Warnungen erscheint zunächst nicht unplausibel.

Warnungen kommen nicht "inflationär" vor oder weil etwa viele Zellen schlagartig ihr Entwicklungsstadium sprunghaft steigern mit daraus resultierenden Warnungen. Einige starke Zellen haben alle Warnparameter gesetzt, aber auch die Hervorhebung von nur einer Warnkategorie gibt es, wie auch die teilweise Entkopplung von Warnpotential und Zellstadium (Hagel, Starkregen).

Zur Verifikation werden die Gewitterzeitpunkte, Hagel, Böenschäden oder Überschwemmungen der Medien mit den KONRAD-Warnparametern verglichen. Oftmals lassen sich durch KONRAD die Zeitpunkte genauestens bestimmen bzw. medienseits korrigieren. Dies kann für eine Schadensanerkennung bedeutsam sein. Böenschäden und z.B. vollgelaufene Keller sollten nicht nur vereinzelt genannt sein, da sie auch auf Prädispositionen (Baumängel, Stammschäden) zurückgehen können, ohne dass die Warnschwellwerte überschritten sein mussten.

Neben den Verifikationen anhand von Medienberichten wurde geprüft, inwieweit die Starkregenwarnungen mit der genaueren quantitativen Rohniederschlagsmenge des stündlichen Radar-PH-Produktes übereinstimmen (Abb. 25). Auch liefert die DWD-eigene Meteorologische Applikations- und Präsentationssoftware MAP Informationen über maximale Windböen, stündliche Niederschlagsmaxima und seltener über Hagel an den synoptischen Beobachtungsstationen.

Weiterhin sind die sog. WU10 Sondermeldungen bei Gewittern von ehrenamtlichen Beobachtern bzgl. Hagel, Starkregen und (geschätzten) Windböen geeignet, wurden aber noch nicht verwendet.

2001 haben Nutzer an der Verifikation von Zelldurchgängen am eigenen Ort teilgenommen. Beispielsweise sind die Eintrittszeiten, Hageldurchmesser, Vorwarnzeiten etc. dokumentiert.

Schließlich zeigen bereits kleine Blitzcluster des BLIDS Systems die Notwendigkeit die zugehörigen Zellen mindestens als KONRAD-Sekundärzellen zu markieren. Letzteres funktioniert befriedigend, teilweise wurden auch schon Sekundärzellen (Echosäule 4-6 km Höhe) vor dem ersten Blitz richtig markiert. Im 2D-KONRAD PX-Produkt sind jedoch viele "Schauerkerne" (>7,5 mm/h) ohne Blitzaktivität, wegen fehlender 3D-Identifikation in KONRAD PZ als starkkonvektive Sekundärzelle,.

Die MAP-Verifikation ist im Ergebnis noch nicht ausgereift. Da der 23mm/h-Niederschlag einer Primärzelle (z.B. für weniger als 5 min, und damit 25 km/h Zuggeschwindigkeit entsprechend) nur ca. 2-3 mal pro Jahr lokal vorkommt (Ombrometerstatistik Hp) ist die Häufigkeit für eine direkte Primärzellenverifikation mit Warnungen an einer synoptischen Station begrenzt auf einzelne Starkregengefelder und Böenregistrierungen.

11.2 Zell-Analyse durch benachbarte Radargeräte

KONRAD katalogisiert Primärzellen nach bestimmten Schwellwerten, die eine gewisse Raumrepräsentanz (Auflösung) und einen Wertespielraum (Klassen) haben. Der Nutzer erwartet nun, dass dieselbe Zelle im günstigen Fall von einem gut justierten Nachbarradar ebenso, mit den gleichen Warnungen versehen, analysiert wird. Ist dies nicht bzw. sogar erheblich abweichend der Fall, ist sein Vertrauen in KONRAD und die Radarmethode geschmälert. KONRAD setzt aber nur um, was die ursprünglichen Produktdaten enthalten und diese können sich z.B. in der Horizonteinschränkung (Sichtbarkeit), in entfernungsabhängiger Auflösung (Hagelschlauch), in der Ortungshöhe (über Station), der Strahldämpfung (Weg, Radom) und evtl. Zeit (PZ) unterscheiden. Nicht auszuschließen ist ferner, dass sich 2D-Zellkerne zersplittert darstellen können.

Die Zellmittelpunktslage sollte weitgehend übereinstimmen wenn keine Dämpfungseffekte vorliegen. Nachfolgend werden einige Zellverläufe in Überlappungszonen zweier Radars in KONRAD VX verglichen. Die dazugehörigen Radarstandorte sind z.T. an den jeweiligen bogenförmigen 100 km-Radien zu erkennen.

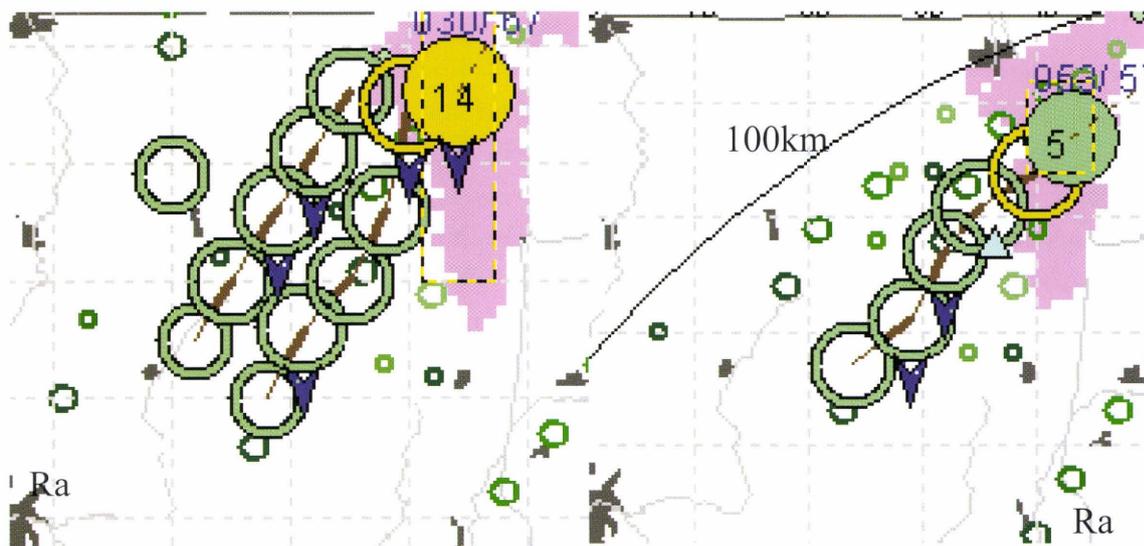


Abb. 25: Zellzugstraßen am 3.8.01, 01:30-02:00 UTC der neueren Radars Hannover, links und Ummendorf, rechts, in KONRAD PX Online. Der zweite Zellverlauf, westlich Zelle 14 ist rechts nur als Sekundärzelle eingestuft. Wegen der Randlage (nahe 100km) fällt hier auch der Zellkernrahmen kleiner aus. Die Böenwarnungen sind ansatzweise vergleichbar, überwiegend identisch ist jeweils die mit konvektivem Niederschlag belegte Fläche.

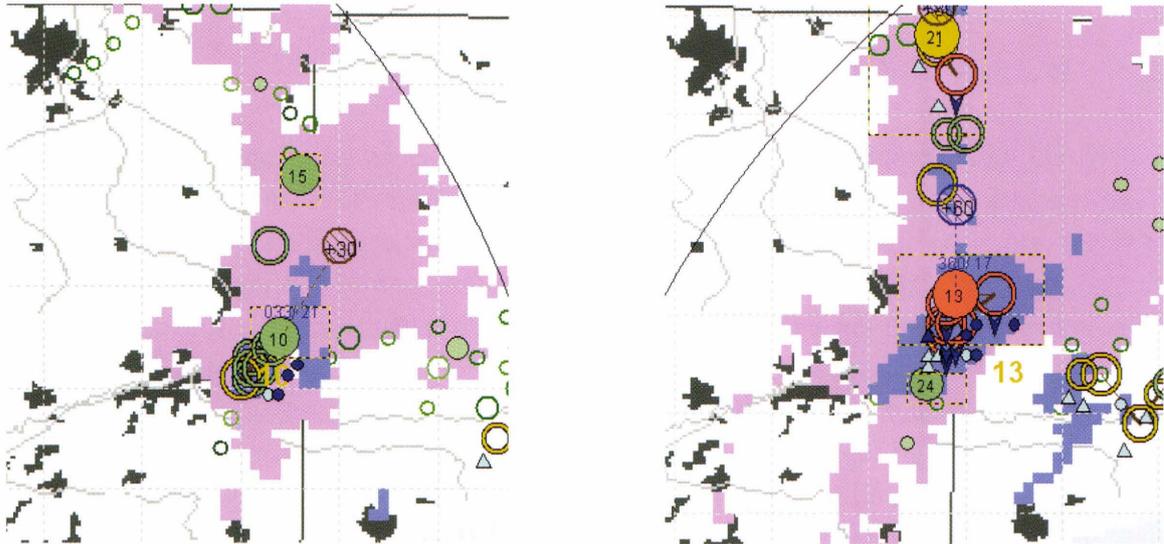


Abb. 26: Überlappungsbereich von KONRAD PX Online von Essen (links) und Flechtdorf (rechts) gesehen, 3.5.01, 15:30-16 UTC. Flechtdorf stellt eine intensivere Entwicklung dar. Gleicher Fall wie Abb. 11, links oben die Stadt Münster. Beachte die Bogenlinien der jeweiligen 100km Messbereiche (daraus Lage des Radars) und die hier unterschiedliche Ausdehnung des violetten Zellumgebungs-niederschlags $>2\text{mm/h}$.

Von zwei Radars aus können in der Praxis also die Zellbewertungen unterschiedlich sein. Auch die Anzahl, Dichte und der Entwicklungsverlauf von Primärzellen ist nicht identisch (Abb. 25). Einerseits kann die Eigendämpfung des Niederschlags und der Sichthorizont die Zellstrukturen von verschiedenen Blickrichtungen etwas modifizieren, trotzdem gewinnt man den Eindruck, dass zuweilen das eine Radar den Verlauf intensiver bewertet als das andere (Abb. 26).

Auch in Abb. 27 ist trotz großer Übereinstimmungen eine offenbar häufiger wirkende Schwächung der Zelldarstellung im einen (Essen, EEC-Radar, Statistisches Clutter Filter, 1991) gegenüber dem anderen Radar (Neuheilenbach, Gematronik, Doppler Clutter Filter, 1998) erkennbar. Ob dies nur auf den älteren Radartyp insbesondere mit einem gealtertem Radom und/oder die ungünstigere Filterung zurückzuführen ist, konnte nicht festgestellt werden.

Die Zugbahnen (und Prognosepositionen) können bei zwei Radars gering voneinander abweichen, wenn die Kernstrukturen etwas unterschiedlich "gesehen" werden.

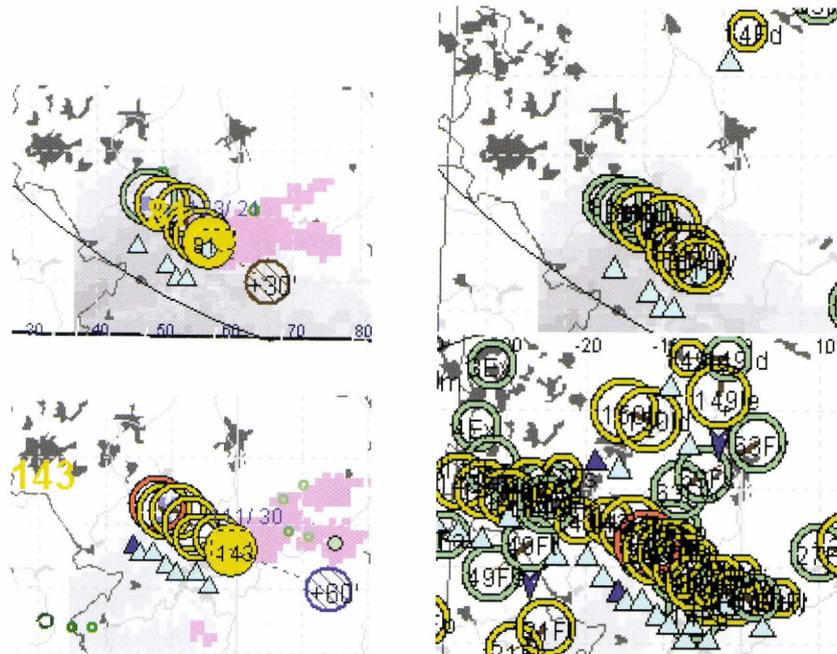


Abb. 27: Vergleich der 30 min und 24h-Zugbahnen ausschnittsweise im Überlappungsgebiet von Radar Essen (oben) und Neuheilenbach (unten) am 30.6.01, 16:30-17:00 UTC, links und ganztags im Überblick, rechts. Beachte links die Übereinstimmung des violetten Umgebungsniederschlags und des Starkregenfeldes.

Ähnliches gilt auch für das Radar München (EEC, 1987) und Türkheim (Gematronik, 1998). Abb. 28 zeigt an den unterschiedlichen Zugbahndichten und an der Schwellwertüberschreitung zur Hagelstufe 1 hin die schwächere Wiedergabe des Niederschlagssignals (München).

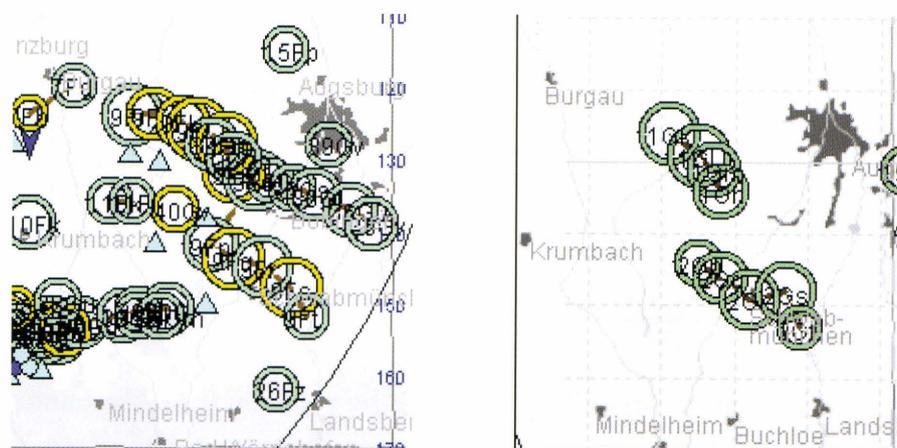


Abb. 28: Vergleich der ganztägigen Zugbahnen und Warnungen des Radars Türkheim, links mit jenen des Radars München, rechts, 27.08.01

Auch die unterschiedlich wirksame Dämpfung unterhalb der Schwelle für die Markierung "Zelldämpfungsstrahl >3dB" spielt offenbar bereits eine Rolle bei der Zellbewertung. In Abb. 29 wird klar, dass schon geringere als die markierten Dämpfungen einzelne Primärzellen reduzieren und damit Zellabschnitte unterbrechen können. Auch die Hagelstufen können unterschiedlich und Starkregenfelder in Einzelfällen nicht reproduzierbar sein.

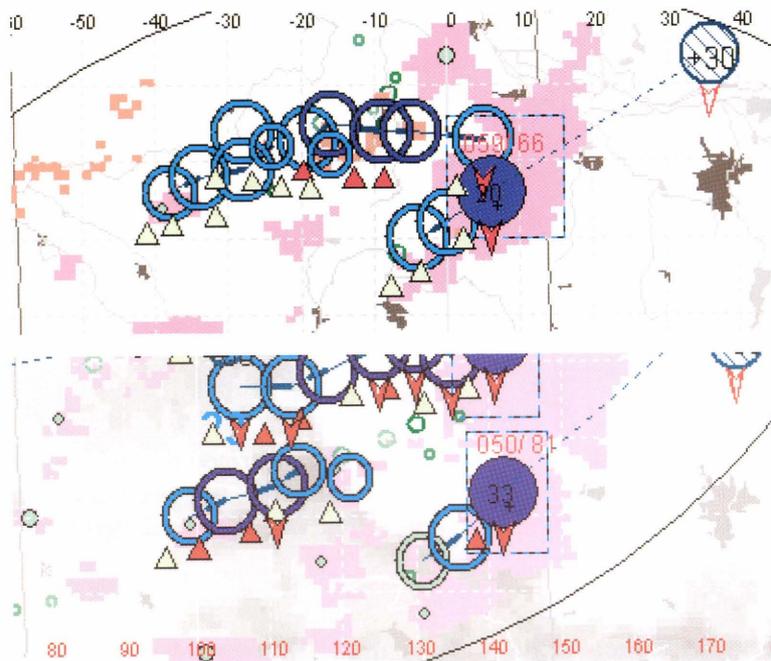


Abb. 29: "Übersehen" eines Zugbahnabschnittes durch Dämpfung und Randlage, Dresden (oben) und Berlin (unten), 17.8.00, 12:05-12:36 UTC. In Berlin fehlt zuletzt der mittlere untere Zellverlauf, in Dresden wird die nördlichste Zelle durch Verstümmeln am Bildrand übersehen. Die Zugrichtungsprognose ist gut.

Einer verstümmelten Darstellung von Zellen in Randlage kann durch KONRAD auf der Basis eines PX (oder DX-) Komposits begegnet werden, wenn die Zellübergänge ins Nachbarradar (weitgehend) kontinuierlich sind. Etwaige technische Ursachen für Unterschiede in der Radarempfindlichkeit sind im Zuge des Kompositverfahrens wahrzunehmen und im ganzen fraglichen Bereich zu korrigieren.

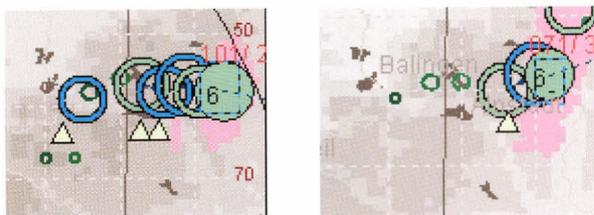


Abb. 30: Vergleich einer schwachen Zelle 6 am 18.7.01, 16:36-17:05 UTC. Links Radar Feldberg (1506m) und rechts Radar Türkheim (731m). Ersteres scheint etwas sensibler zu sein.

Auch bei gleichwertigen Radargeräten scheint häufig noch ein Rest Abstimmungsbedarf zu bleiben (Abb. 30). Die KONRAD-Zellbewertung in Kategorien und deren Vergleichsanspruch ist ja deutlich größer als die geforderte Reproduzierbarkeit von Reflektivitäten quantitativer Niederschlagsbestimmung. Diese muss bei den obigen Vergleichsradars deutlich unterschiedlich ausfallen. Erkennbar wird das in KONRAD an den unterschiedlichen Strukturen des jeweiligen Zellumgebungs-niederschlags >2mm/h, also der Struktur der violetten Felder. Zu berücksichtigen ist in diesem Fall aber auch der Unterschied (775m) in der Aufstellungshöhe beider Radargeräte.

Die Tatsache, Einzelheiten der KONRAD-Analyse nicht deckungsgleich reproduziert zu sehen, verzögert zunächst die Anstrengungen, KONRAD-Algorithmen weiter zu verfeinern bzw. Klassengrenzen enger zu setzen. Die beiden Warnstufen z.B. beim Hagel sind manchmal nicht äquivalent. Die KONRAD-Methodik selbst wird qualitativ kaum beeinflusst, wenn die Reproduzierbarkeit noch Schwächen aufweisen sollte. Die Notwendigkeit von Dämpfungskorrekturen der Rohdaten und der schonendsten Clutterfilterung erscheint im starkkonvektiven Szenario Voraussetzung für hinreichend vergleichbare Zellanalysen zu sein.

11.3 Erste Statistiken zu Zellverläufen

Eine statistische Bearbeitung von Zellanalysen durch KONRAD ist notwendig, um auch die Verlässlichkeit der verwendeten Algorithmen zu charakterisieren. Bisher liegen nur Einzeltage (17.8.00 Berlin) mit Zellstatistiken vor. Dabei ging es u.a. um folgende Fragen :

- Mittlere Beziehung Zellkernvolumen/Zellkern Basis
- Beziehung zwischen Zellgrößen und Hagelauftreten
- Übergang vom Zellkern zur "Linienstruktur"
- Beziehung zwischen Lebensdauer und Zellgröße
- Güte der 30 min-Positionsprognose, Zugrichtung
- Erreichen langanhaltende Zellen höhere Zellstadien

Zu diesen Fragestellungen liegen nur erste Anhaltspunkte vor, viele Diagramme dazu sind noch nicht genügend signifikant. Die Untersuchungen beziehen sich auf (ausgereifte) Primärzellen. Die variable Raumauflösung des Radars und die Echoklassifizierung erhöhen die Streuung bzw. schränken die statistischen Aussagen ein.

Zwischen dem Alter einer Zelle und der Häufigkeit hagelverdächtiger Abschnitte besteht keine Beziehung. Ebenso verhält es sich mit der Lebensdauer und der maximalen Kerngröße; langlebige Zellen scheinen nicht immer größere Ausmaße als kurzlebige anzunehmen (keine Superzellen beteiligt). Auch werden die höchsten Zellstadien nicht nur bei langanhaltenden Zellen erreicht, wenngleich sich die Stadien 3 und 4 häufiger bei Zellen mit Lebensdauer >60 min finden lassen.

Es scheint bei elliptisch umrissenen Zellkernen schon bei kleinen Zellen linienförmige Kernstrukturen mit Achsenverhältnis 5:1 zu geben (Abb. 7). Ab 20 km Länge "greift" der Böenalgorithmus in der Annahme einer entwicklungsfähigen Böenlinie bzw. "bow echo" bzw. eines "line echo wave patterns" LEWP.

Für die 30 min Prognosepositionen sind 10 km Lageunsicherheit als normal anzusehen.

Langsamziehende Zellen im SLOW Status (siehe Tab. 4) scheinen in ihrer bisherigen Richtung weiterzuziehen und nicht durch Bildungstendenzen an den Zellflanken eine Ver-

langsamung und Richtungsänderung zu verursachen. Trotzdem sind die Zugprognosen bei langsamen Zellen sehr unregelmäßig.

An Tagen mit zügigen mittleren Verlagerungen von 60 km/h (17.8.00, BLN) blieben 2/3 aller Richtungswechsel von 5 min zu 5 min unterhalb 20°.

Aus Abb. 31 leitet sich ab, dass höchstwahrscheinlicher Hagel (>17 Pixel >55 dBZ) sicher erst ab Zellkernen von 150 Pixel, also etwa 140 km² auftritt. Dies sind ohnehin größte

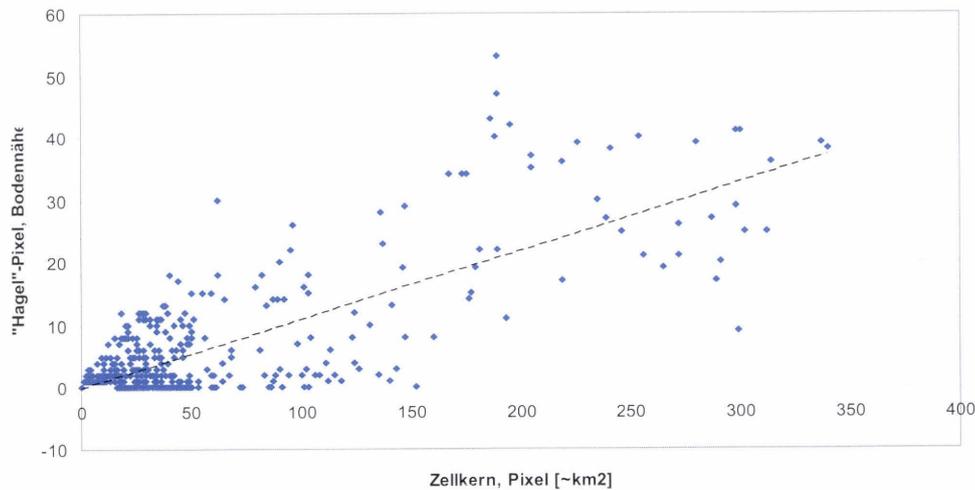


Abb. 31: Abhängigkeit der Anzahl beobachteter bodennaher Hagelpixel (>55 dBZ) von den gesamten Zellkernpixeln > 23 mm/h, 17.8.00, Berlin, entnommen den PX Zell-Listen.

Zellkerne bzw. Formationen. Daneben kann Hagel auch schon bei 50 km² Kernen auftreten.

Aus der KONRAD-PZ Statistik ergab sich, dass Hagelstufe 2 (Kriterium: 55 dBZ oberhalb 6 km) bei nahezu jedem Zellkernvolumen und geringstem Gesamthagelanteil (schmale Hagelsäulen) vorkommen kann (Abb.: 32) Dabei steigt der Hagelanteil schon bei kleinen Zellkernen stark an und bei größeren deutlich weniger.

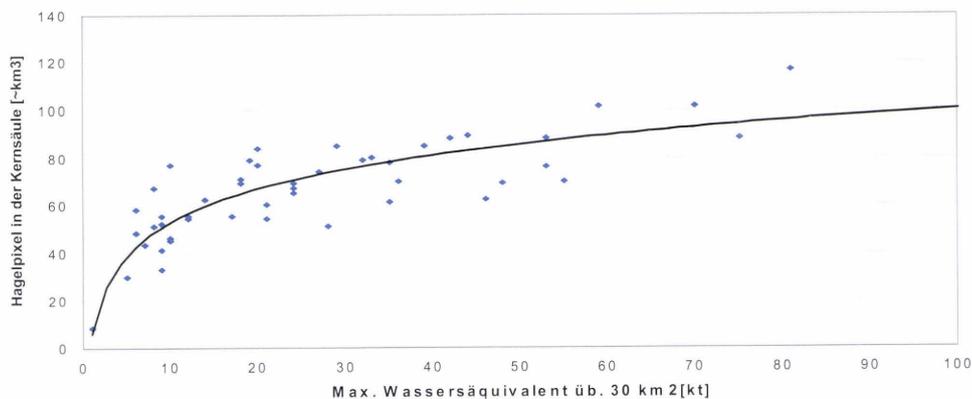


Abb. 32: Bezug der Gesamtanzahl wahrscheinlicher Hagelpixel im Zellkernvolumen bei Hagelwarnstufe 2 zu entsprechender maximaler Zellkernsäule (in abgestuftem Wasseräquivalent) bzw. Kernintensität und -höhe.

Es gibt langlebige Zellen, die kaum Hagelindikatoren ausbilden. Mit zunehmender Tophöhe nimmt im Mittel auch die Basisfläche zu. Bei einzelnen Zellen gibt es keine klare 2D-Kerngröße, ab welcher hagelverdächtige Pixel in Bodennähe eingebettet sind.

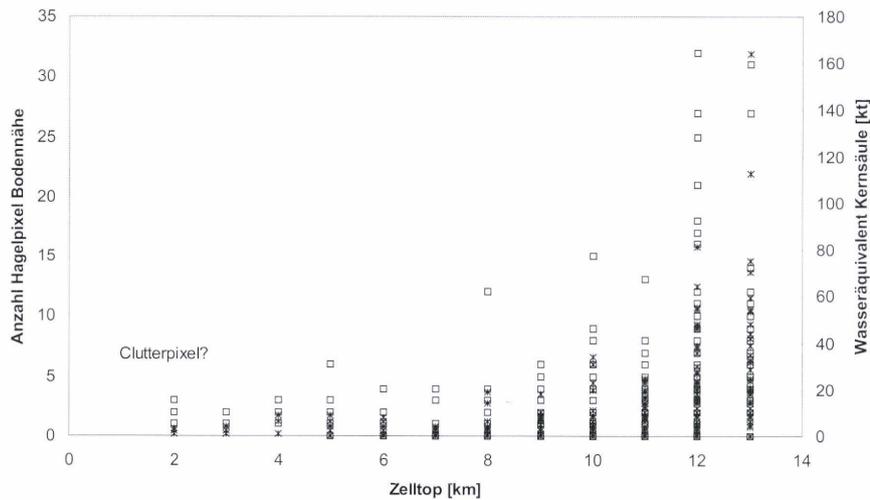


Abb. 33: Beziehung zwischen Zelltophöhe (Abszisse) und wahrscheinlichem Hagel am Boden bzw. dem Hagel in der Zellkernsäule: Links, die Zahl bodennaher Hagelpixel (PZ2) in der Kernfläche an der Zellbasis □ (incl. einiger restlicher Clutterpixel), rechts, das Hagelvolumen (>55 dBZ, Wasseräquivalent) in der Zellkernsäule *.

Abb. 33 verdeutlicht die Zunahme von Hagelelementen bzw. der Hagelwahrscheinlichkeit in der Zellsäule, wie auch in der Bodenfläche mit Zunahme der Tophöhe. Eine sicherere Hagelaussage scheint erst für Zellen möglich, die mindestens ~9 km Tophöhe erreicht haben, >7 Hagelpixel (~14 km²) in Bodennähe und im Volumen mehr als 30 Kilotonnen (kt) Wasseräquivalent in hagelverdächtigen Echos aufweisen. Diese 14 km² erinnern an die 2D-Entscheidung zur Hagelstufe 2, Hagel- gegenüber Starkregenwahrscheinlichkeit.

Für die notwendige Beziehung zwischen Zellvolumen und seiner Basisfläche gibt Abb. 34 eine einfache Umrechnung, die z.B. bei der Festlegung der 3D- und 2D- Zellstadien Verwendung finden könnte. Die Häufigkeit von Hagelaufreten im Zellebenszyklus ist nicht mit dem maximal erreichten Zellstadium in Bezug zu bringen.

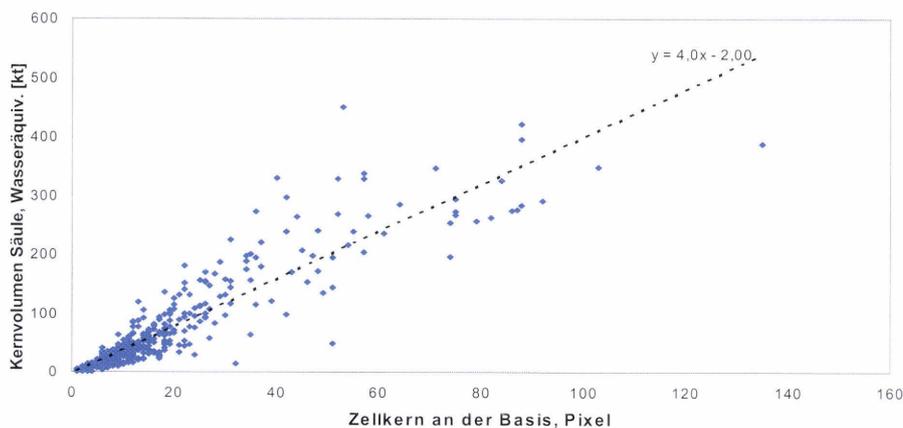


Abb. 34: Beziehung des Zellkernvolumens zur Anzahl der Pixel an der Kernbasis (PZ2). Näherungsweise Umrechnung von Volumen- in Basispixel beim Schwellwerten zum Zellstadium.

12. KONRAD[©] außerhalb der Sommerjahreszeit

KONRAD läuft im Einsatz zusammen mit einer weiteren Software zur Radarbilddarstellung für Nutzerbelange unter dem Namen KORABI, die die KONRAD-Listen geeignet darstellt.

Es wurde schon gesagt, dass es je nach Wetterlage neben Zeiträumen mit dichter Primärzellenfolge lange Zeiten ohne oder nur mit mäßigkonvektivem Niederschlagsgeschehen gibt. In schwachkonvektiven Situationen wird in KORABI die Darstellung nur noch auf die Niederschlagsfläche $>2\text{mm/h}$ und möglicher eingelagerter Schauerkerne beschränkt.

Wintergewitter z.B. an Kaltfronten (konvektive Umlagerungen an Luftmassengrenzen) werden nach bisheriger Erfahrung nur als Sekundärzellen oder Schauerkerne eingestuft, da der als Tracer benutzte Kernniederschlag mit 23 mm/h nicht mehr an 15 km^2 auftritt. Das bestätigt die meteorologische Erfahrung, nach der Gewitter der kühlen Jahreshälfte nicht die Intensität sommerlicher Unwetter entwickeln. Auch ist eine PZ-Sekundärzelle mit ca. 8mm/h bis 6 km Höhe außerhalb des Sommers entsprechend selten, vielleicht mit der Ausnahme von Graupelschauern in Kaltfronten (Aprillagen).

Bisher wurden kaum extreme sog. Bright Band Effekte durch große angetaute Schneecuster in Bodennähe beobachtet, die über feuchte große Eiskerne viele Regentropfen mit Regenintensitäten um 23 mm/h vortäuschen, wie es der Normalität entspräche. Hier kann es vorübergehend zu (stationären) Pseudozellen kommen. Ebenso gibt es einzelne ziehende Fronten, wo vorübergehend größte Tropfen offenbar mit Eisanteilen in Bodennähe auftreten. Kennzeichnend ist dabei, dass die hohen Reflektivitäten erst direkt in Bodennähe erreicht werden.

Da KONRAD hauptsächlich einen räumlich-/zeitlichen Überblick über das Unwetterpotential konvektiver Systeme bieten soll, ist es für die Anwendung in Jahreszeiten ohne diese typische sommerliche Konvektionsform ungeeignet.

13. Kooperationen und Praxiserprobung bei KONRAD[©]

KONRAD wurde am MOHp als ergänzendes Produkt zu den Radarbildern in dBZ-Stufen mit einer vom Rechner generierten fachkundigen Interpretation entwickelt.

Die zwei Erprobungsstellen Büchel und Penzing bei Landsberg lieferten über Meldeblätter lokale Verifikationen zum Zellverlauf am Ort.

KONRAD wuchs zu einem neuen Produkt, das symbolorientiert und selbsterklärend Rückschlüsse über Gewitteraktivitäten und ein sich anbahnendes Unwetterrisiko auch für den fachfremden Nutzer ermöglicht. Im Rahmen einer Praxiserprobung sollte das neue Produkt getestet werden.

Im Rahmen ihrer regionalen Aufgaben waren große Feuerwehrzentralen ein erster Nutzerkreis, der eigene Warnschwellwerte und eigene Unwettereinschätzung an den Wetterauswirkungen misst. Im Sommer 2001 gab es den Einsatz von KORABI bei den Feuerwehrzentralen Ingolstadt und München mit der Verifikation im Gegenzug und Bewertung von

KONRAD (Radar München). Beratende Fachzentrale war hierzu die RVZ München (Radar München, Türkheim, Eisberg, Neuhaus).

Kooperationen zu KONRAD gab es mit dem Amt für Wehrgeophysik der Bundeswehr (H. Weber), die im Projektrahmen das TOPOGRAPH Programm beisteuerten und KONRAD-PX-Listen von Neuheilenbach, München und Türkheim erhielten. AWGeophysBW entwickelte eine eigene Darstellung von KONRAD-Parametern auf der Basis PL mit einer komfortablen Zoomtechnik (KONRAD nur 5 Zoomausschnitte). Die wichtigsten Zell- und Warnparameter wurden dargestellt. Auch hier gab es lokale Verifikationen über Meldeblätter zum Zellverlauf am Ort. Die Kooperation wird fortgesetzt (Beratungsmethoden, Eignung KONRAD an Flughäfen etc).

Schließlich wurde in einer Kooperation mit DWD Basisdienste, Entwicklung und Anwendung ein Versuch unternommen KONRAD PZ im 15 min Zyklus und als Komposit v.a. bzgl. der Zellstadien und Zugbahnprognosen einzusetzen und in die Meteorologischen Analyse- und Präsentationssoftware (MAP) zu integrieren. Hierbei war allerdings die Prognoseerwartung über +60 min, durchgängig stabile Pixelstrukturen und exakte Kernprognosen nicht zu erreichen. KONRAD VX Online profitiert in der Nutzerakzeptanz von der Synergie der Einzelinformationen zur Zelle, sowie von dem Überblick über die jüngste 30 min-Entwicklung und deren Kontinuität (Zugbahn). Die Problematik einer Böen-, Starkregenvorhersage am Prognosepunkt +60 min zeigt sich aber bisher aus den aktuellen Radar-daten allein als nicht befriedigend lösbar.

14. Zusammenfassung der Ergebnisse

KONRAD ist aufgrund stabiler Algorithmen ein robustes System, welches konvektive Zellen in vier Stufen bewertet, Warnungen einschätzt und die jüngste Zugbahn und Entwicklung als Basis für eine extrapolierende Prognose nutzt.

Ziel war es, von den herkömmlichen, teils unübersichtlichen und nur durch erfahrenes Personal zu interpretierenden Radarbildern wegzukommen und die inhaltliche Interpretation von wesentlichen Zellentwicklungen in Radarprodukten zu automatisieren und durch Symbole übersichtlicher und sowohl leichter als auch schneller verständlich zu machen. Anwender von KONRAD sollten Fach- wie auch externe Nutzerkreise sein.

Als Kriterium und Markierung für den Begriff konvektive Zelle gilt ein Zellkern bzw. Schauerschaft von ca. 23mm/h Regenintensität aufwärts, der sich auf mehr als ca. 12-15 km² erstreckt. Im Sommer ist diese Regenintensität entsprechend der KONRAD-Erfahrungen mit konvektiven Niederschlagsprozessen verbunden, die bis oberhalb 5 km reichen und meist mit elektrischen Entladungen gekoppelt sind.

Vor einem Einsatz von KONRAD im DWD Radarverbund musste das Problem gelöst werden jegliche unerwünschte Pseudozellen zu eliminieren bzw. zumindest zu identifizieren.

Als wichtigstes KONRAD-Produkt hat sich die Online-Darstellung herauskristallisiert, die eine 5 min Verfolgung der Zellbasisfläche, ihre aktuelle Entwicklung und ihre Zellhistorie

von 30 min beschreibt. Weitere Zellanalysen werden parallel dazu im 15 min Zyklus mit Berücksichtigung der vertikalen Zellstrukturen durchgeführt.

In der Darstellung werden diese sog. Primärzellen durch Sekundärzellen in einem untergeordneten Entwicklungsstadium und durch die als noch konvektiv eingestufteten Niederschlagsfelder der Zellumgebung ergänzt. Die Zellidentität selbst basiert auf der Kontinuität der bisherigen Zellverlagerung und der hohen Bezugswahrscheinlichkeit engster Zellpositionen.

Der Wert von KONRAD-Zellanalysen liegt in der automatisch generierten Einschätzung einer lokalen und ziehenden Zellentwicklung im Kontext zu ihrem jüngsten Warnaufkommen, ihrer kontinuierlichen Zugbahn und der Entwicklung von Nachbarzellen. Letzteres gilt v.a. für Zellformationen, in denen die Einzelzellen stärker fluktuieren als im Einzelverband.

Die Übersicht und Synergie von z.B. Zellstadium, Unwetterpotential und Entwicklung führt zu einem wesentlichen, leicht überschaubaren Informationsgehalt auch wenn z.B. die 30 min Positionsprognose im Detail noch Schwächen hat. Da eine Zugbahn aus Verlagerung und Umbildung der Zelle besteht, sind Richtungsabweichungen nicht auszuschließen. Die Warnungen sind in einem guten Qualitätsstatus; Hagelwarnungen sind an die Indikation von gemessenen 55 dBZ Reflektivität geknüpft, bzw. an große Streumediten oberhalb 6 km Höhe.

Ein 30 min-Starkregen wird lokal durch Überdeckung hoher Echostufen ermittelt; Böenwarnungen sind aus schnellziehenden Zellen, der Existenz von Linienstrukturen ("bow echos") und ausgeprägten Hagelzellen abgeleitet. Die Versuche zumindest einige Situationen mit großem Hagel zu erkennen sind ermutigend und entwicklungsfähig. Die Starkregenwarnung (Richtwert: 12mm/30min) wurde von den Feuerwehren als zu hoch gesetzt gesehen und ist deshalb 2002 etwas reduziert worden.

In vielen Fallstudien während 2000 und 2001 und an allen Verbundradarstationen hat sich KONRAD bewährt (siehe Kapitel 9). Nutzerkreise geben i.A. gute Verifikationen und Bewertungen. Auch wird von ihnen ein nutzbarer Vorhersagezeitraum gesehen. Weitere Starkregensituationen und Böenkonditionen können allerdings zusätzlich im mäßigkonvektiven Umfeld, in längeren Zeiträumen bzw. ohne Primärzellentwicklung auftreten.

Dies wird ein eigenes Arbeitsfeld darstellen, in dem die Konvektion und Verlagerung eine nachgeordnete Rolle spielen. Wenn die lokale Neubildung ausgedehnter anhaltender Niederschlagsprozesse (Stau, Aufgleiten) den wesentlichen Informationsgehalt darstellt, sind andere als die KONRAD-Strategien gefragt.

Schauerkerne scheinen weniger System und Konsistenz in ihrer Verlagerung zu haben, was schon an den diffuseren Bahnen der Sekundärzellen zu erkennen ist. Dies kompliziert die Verlagerung schwachkonvektiver Niederschlagsgebiete.

Einigen Nutzern sind allerdings die KONRAD-Darstellungsinhalte schon zu komplex bzw. nicht mehr ausbaufähig (Beispiel Abb. 20).

Die einfache Anzeige von Niederschlagsdämpfung an einzelnen ausgeprägten Zellen soll ein Hinweis sein auf mögliche Unterschätzungen im Hintergrund (d.h. im Sichtschatten), auch ohne praktikierbare Korrekturansätze.

Einen beachtlichen Erfolg konnte KONRAD am 03.08.2001 im Raum Miesbach-Rosenheim (Schäden >50 Mill. €) verbuchen, mit zutreffenden Hagel- und Böenwarnungen, sowie Vorwarnhinweisen.

Das Ausmaß von Katastrophen (großer Hagel, anhaltender Starkregen und Spitzenböen >Bft.10) selbst ist aus gemessenen Daten von Standardradars schwierig abzuschätzen. Hier muss vorher die Reproduktion bzw. Eindeutigkeit von Radardaten bzgl. Raumvolumina stabilisiert werden.

Man muss sich auch klar darüber sein, dass die Radarfernerkundung grundsätzlich nicht fehlerfrei oder immer eindeutig interpretierbar arbeitet. Dennoch liefert sie einen relativ objektiven Überblick über die aktuelle Lage, die auf anderen Wegen kaum zu erhalten ist.

Die bisherige Verifikation von KONRAD-Warnungen stützt sich auf zusätzlich vorhandene Radarprodukte, MAP Daten, lokale Beobachtungen (Fachpersonal, Nutzer) und Medienberichte. Die wesentlichen Warnsituationen selbst sind meist und gut in KONRAD wiederzufinden, weniger klar ist die Zahl der möglichen aber unverifizierten Fehlwarnungen v.a. wenn sie verstreut im unbewohnten ländlichen Raum vorkommen.

Ein Problem für weitere Verfeinerung von KONRAD im Radarverbund DWD ist die Tatsache, dass die Bodenechofilterung, Dämpfung, Kalibrierung und die Sichthorizonte Unterschiede in den KONRAD-Aussagen zweier Radars verursachen. Da KONRAD auf gleiche Produkte mit gleichen Algorithmen zugreift, ist zunächst eine Angleichung der Radardaten über entsprechende Qualitätskontrolle und -sicherung anzustreben. Verschiedene Zell- oder Warnhinweise sollte es für benachbarte Radarstandorte nicht geben können, zumal die Merkmale ohnehin nur in grober Abstufung verwendet werden.

Eine wichtige Voraussetzung für das optimale Funktionieren von KONRAD ist der Aufbau eines guten Qualitätsmanagements u.a. für die Radargeräte mit entsprechend hohem Kalibrier- und Justierstandard.

KONRAD besitzt noch vielfältiges Entwicklungspotential. Ein Einbau von Sfericsortungen könnte einen früheren Hinweis auf beginnende neue Zellen liefern, die Radialwindmessung kann für die Windwarnung genutzt werden und eine Schnittstelle zwischen numerischen Mesoscale-Modellen und aktueller Radarortung kann die Prognose der Weiterentwicklung in der kommenden Stunde verbessern. Im jetzigen Entwicklungsstadium soll aber bereits Nutzen gezogen werden, ohne dass künftige Verbesserungen abgewartet werden müssen.

KONRAD Daten und Algorithmen wurden in Pilotstudien von dem AWGeophysBW und versuchsweise in MAP übernommen. Wesentlich ist, die Chancen, Grenzen und Erfahrungen der Radar-Zellanalyse zu beachten und eine optimale Darstellung zu realisieren.

Die große Fortschritt, den KONRAD (und weitere Fernerkundungsverfahren) bietet, liegt in der automatischen Interpretation unwetterträchtiger Wetterlagen, so dass sich ein Entscheidungsträger über seine lokale Situation in Bezug auf die Unwetterentwicklung aktuell informieren kann. Dadurch entfällt der Zeitverlust, der durch die Übermittlung von Warnungen aus einer Zentrale entsteht. Diese laufende Kontrolle kann sich schadensmindernd auswirken.

Die Ergebnisse der KONRAD-Saison 2002 konnten in dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt werden und werden in einer gesonderten Publikation behandelt.

Ausblick

Die Herausforderung von KONRAD (und weiteren Fernerkundungsverfahren) ist, die Förderung von fortlaufendem räumlichen Nowcasting und eine präzisere Unwettervorhersage im DWD. Dies bedeutet einen aktiven laufenden Kontakt zu Kunden, die "auf der Zugbahn" von gerade wirksamen Zellen liegen. Allerdings ist auch mit einer Eigenberatung von KONRAD-Nutzern zu rechnen. Letztere sind trotzdem vom betreuenden Meteorologen zu schulen bzw. mit Manuals zu versehen,

Bei den Medien ergibt sich die Chance zu vermitteln, man verfolge alle Zellen im Einzugsgebiet, man weiß, was, wo gerade geschieht und auch der Nichtbetroffene erhält den Eindruck von kompetenter Verfolgung von Entwicklungen. Das häufigere Zutreffen von Hinweisen in der Fläche kann manche lokale Fehleinschätzung ausgleichen.

Auch die Information von gänzlich gewitterfreien Räumen ist wesentlich.

Als nächste Schritte bei der Weiterentwicklung von KONRAD sind vorgesehen:

Vordringlich ist die Abstimmung der im Verbund beteiligten Radargeräte auf gleiche KONRAD-Bewertungen, außer der bekannten Effekte (alte Radartechnik, Dämpfung, Rand).

Hier sind noch einige Untersuchungen in den Überlappungsbereichen nötig. Ergänzend ist ein Konzept für einen laufenden Radarvergleich auf Produktbasis entwickelt worden, das angibt, in welchem Randstreifen entsprechende Meßvolumina vergleichbare Ergebnisse erwarten lassen. Unterschiedliche Meßvolumina können auch einige natürliche und richtige Echounterschiede hervorrufen, die in ihrer Häufigkeit und Repräsentanz näher untersucht werden müssen.

Eine Verbesserung der Hagelanalyse ist durch die bessere Auswertung von Vertikalstrukturen aus PZ anzustreben, durch Synchronisation von PZ alle 15 min und Sicherung der momentanen vertikalen Hagelaussage. Hier ergeben sich allerdings noch Schwierigkeiten mit der Zellzuordnung von PX (1 km^2) zu PZ wegen der Verwendung des jeweils höchsten Echowertes bei der Bildung der 4 km^2 Pixel und Randproblemen, die zu überwinden sind.

Weiterhin ist die Übernahme der ANAPROP-Identifikation (PZ) in die PX-Liste geplant. Diese Information kann auch für andere Bereiche der Radarnutzung von Interesse sein.

Es wird zu prüfen sein, ob diverse grob aufgelöste Dopplerprodukte die Böenwarnung wesentlich ergänzen können, z.B. durch gemessene Radialwindkomponenten $> \text{Bft. 8}$ (Windvektor noch größer). Problem hier ist eine Richtungsabschätzung einer möglichen Böenfront vorzugeben. Allgemein erscheint eine weitere, höchste Warnstufe erforderlich.

Die Starkregenklassifikation könnte bei Verwendung eines feiner aufgelösten Ausgangsproduktes (siehe DX) verbessert werden, trotzdem bleibt erfahrungsgemäß auch ein Unterschätzen wegen noch fehlender Online-Aneicherung mit Bodensammlern. Möglicherweise kann auch ein 1h-Starkregen einbezogen werden.

Die Sekundärzellen in PX, die u. U. nur (bodennahe) Schauerkerne sein können, sollen durch die Vertikalanalyse der Sekundärzellen in PZ ergänzt werden und als vollständige Sekundärzellen hervorgehoben werden.

Die Sicherheit, dass auch die kleineren Blitzcluster als Sekundärzellen in KONRAD bereits markiert sind, soll durch Sonderuntersuchungen verbessert werden. Allgemein soll die MAP-Querabgleichung noch erweitert und vertieft werden.

Die Weiterentwicklung von KONRAD anhand von Nutzererfahrungen kann viele Fortschritte erbringen.

Schließlich soll übergeordnet zur Einzelradarsicht PZ und PX ein sog. DX-Komposit ganz Deutschlands als lückenlose und hochauflösende Datengrundlage für die KONRAD-Analysen dienen. Hier sind aber noch größere Modifikationen nötig, z.B. die Markierung des Raumes mit Datenausfall bei kontinuierlich ziehenden Zellen. Auch eine andere Stereographische Projektion muss angelegt werden, außerdem ist eine nachträgliche Dämpfungskorrektur schwieriger.

Im Jahr 2002 werden die KONRAD-Nutzerkreise erweitert um auch Extremsituationen lokal fachkundig bewerten zu können.

Danksagungen

Herrn H. Weber vom AWGeophysBW Traben-Trarbach sei gedankt für die Unterstützung bei der Underlaytechnik, für Anregungen bei der Darstellung und die Vermittlung von kompetenten Fachnutzern. Herrn Hager von der GeophyBst JaboG32 in Lechfeld sei für die Förderung von KONRAD gedankt.

Herrn Dr. P. Winkler gebührt Dank für die vielen fruchtbaren Gespräche zu KONRAD. Die Kollegen Dr. J. Seltmann und T. Hohmann gaben wertvolle Anregungen zu einzelnen KONRAD-Fragestellungen.

Literatur:

- Browning, K. A., 1977: The structure and mechanism of hailstorms, Hail (Part I: Hail physics): A review of hail science and hail suppression, Met. Monographs Vol. 16, No. 38, AMS Boston, USA
- Burgess, D. W., Joe, P., Potts, R., Keenan, T., May, P., Mitchell, D., Conway, B., Treloar, A., Sills, D., Hudak, D., 2001: Severe storm detection Algorithms for the S2000 Project, 30th Int. Conf. on Radar Met., 19-24 July 2001, Munich, AMS Boston, USA, S.483-485
- COST 78- Proj.2: Nowcasting models and techniques- Inventory, Draft report, Sept. 1995, European Commission
- Dahl, J., Gatzen, Ch., Hoffmann, J., 2000: Das Berliner Hagelunwetter vom 19. August 2000, Verein Berliner Wetterkarte e.V., Beiträge des Inst. f. Met., FU Berlin, 12.12.2000
- Dixon, M., Wiener, G., 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and Nowcasting - a radar-based methodology, J. of Atm. a. Ocean. Tech., Vol 10, No.6, S.785-797
- Doswell III, C. A., 1985: The operational meteorology of convective weather, Vol. II: Storm scale analysis, NOAA Tech. Memorandum ERL ESG-15, Boulder Col.

- Forsyth, D.E., Bjerkaas, C. L., Petrocchi, P. J., 1981: Modular Radar Analysis Software System (MRASS), Prep. 20th Conf. on Radar Met., AMS Boston, 696-699
- Hagen, M. Bartenschlager, B., Finke, U., 1999: Motion characteristics of thunderstorms in southern Germany, *Met. Appl.* 6, S 227-239
- Höller, H., Fehr, T., Thery, C., Selmann, J., Huntrieser, H., 2000: Radar, lightning, airborne observations and modelling of a supercell storm during EULINOX, *Physics and Chemistry of the Earth*, ERAD Proceedings, 1st European Conf. on Radar Met., Bologna, Italy, Sept. 2000, S. 1281-1284
- Holleman, I., Wessels, H. R. A., Onvlee, J. R. A., Barlag, S.J.M., 2000: Development of a hail-detection-product, *Physics and Chemistry of the Earth*, ERAD Proceedings, 1st European Conf. on Radar Met., Bologna, Italy, Sept. 2000, S. 1293-1298
- Lang, P., 1997: Zellentwicklungen und konvektive Niederschlagsprozesse aus der Sicht eines Radars, *promet Jg.* 26, Heft 1/2, S. 43-52
- Lang, P., 1999: Convective radar structures and related rain rate estimation, COST 75 Advanced weather radar systems, Int. Seminar 23-27 March 1998, EUR 18567 EN, European Commission, S.385-396
- Lang, P., 2001: Cell tracking and warning indicators derived from operational radar products, 30th Int. Conf. on Radar Met., 19-24 July 2001, Munich, AMS Boston, USA, S.245-247
- Morgan, G. M., Summers, P.W., 1986: Hailfall and hailstorm characteristics, *Thunderstorm morphology and dynamics*, Ed. E. Kessler, University of Oklahoma press, 2nd ed.
- Polger, P. D., Goldsmith, B. S., Przywarty, J. R., Bocchieri, J. R., 1994: National Weather Service warning performance based on the WSR-88D, *Bull. Am. Met. Soc.*, Vol. 75, No. 2, S. 203-214
- Selmann, J.E.E., Riedl, J., 1999: Improved Clutter Treatment within the German Radar Network: First Results. in: COST-75 Advanced weather radar systems, Int'l Seminar, Locarno, 23 to 27 March 1998. Ed.: C.G. Collier. Luxembourg, 1999, EUR 18567 EN, S.267-279
- Steinacker, R., Dorninger, M., Wölfelmaier, F., Krennert, T., 2000: Automatic Tracking of Convective Cells and Cell complexes from Lightning and Radar data, *Met. Atmos. Phys.* 72, S. 101-110
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., De-Wayne Mitchell, E., Thomas, K.W., 1998: An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D, *Weather Forecasting*, 13, S. 286-303